

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Modelování proudění v armatuře

Modeling of the Flow in the Armature

Student:

Bc. Miroslav Soumar

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Soumar**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: Modelování proudění v armatuře  
Modeling of the Flow in the Armature

### Zásady pro vypracování:

1. Popište funkci, princip činnosti a hlavní konstrukční části měřené armatury.
2. Popište zkušební postupy pro měřenou armaturu, navrhnete měřicí zařízení a provedte měření a zpracování potřebných fyzikálních veličin.
3. Připravte geometrii modelu a výpočtovou síť.
4. Proveďte numerické modelování 3D úlohy pro různé polohy uzavíracího členu.
5. Sestrojte ztrátovou charakteristiku v závislosti na poloze uzavíracího členu.
6. Proveďte zhodnocení úlohy a porovnání s experimentálním měřením.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TU, 2008, 154 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM)
- [2] MIKULA, J. a kol., *Potrubí a armatury*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974, 585 s
- [3] ČSN EN 1267 Průmyslové armatury – Měření průtokových ztrát s použitím vody jako zkušební tekutiny. Srpen 2012.
- [4] ČSN EN 60534-2-3 Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy. Prosinec 1999.
- [5] ROČEK, J. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. s.r.o., 2002, 204 s.
- [6] ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [7] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....19.5.2014.....

Kontakt: soumar.miroslav@gmail.com



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ustřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

v Ostravě ..... 19.5.2014 .....

.....

podpis student

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Soumar Miroslav. Modelování proudění v regulačním ventilu. Ostrava: Katedra Hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014, 54s. Vedoucí Jana Jablonská.

Diplomová práce se zabývá měřením dle normy ČSN EN 60534-2-3 „Regulační armatury pro průmyslové procesy“, které proběhlo v areálu VŠB-TUO. Dále matematickým modelováním měřené armatury v programu AnsysFluent.

V závěru práce jsou verifikovány výsledné charakteristiky regulačního ventilu obou metod. Práce vznikla ve spolupráci s firmou Armatury Group a.s., která má zájem o srovnání změřených a modelovaných charakteristik.

## **ANOTATION THE THESIS**

Soumar Miroslav. Modeling flow in controlvalve. Ostrava: Department ofHydromechanics and HydraulicEquipment, FacultyofMechanicalEngineering, VSB-Technical University of Ostrava, 2014,54s. Leader Jana Jablonská.

This thesis dealswiththemeasurementaccording tonormČSN EN 60534-2-3 "controlvalvesforindustrialprocesses," whichtook place in thepremisesof VŠB-TUO. Italsodealswithmathematical modeling ofthemeasuredvalve in AnsysFluent programe.

There areresultingcharacteristicsofthecontrolvalveofbothmethodsverified in conclusionofthe thesis. This thesis wascreated in cooperationwithArmatury Group a.s., whichisinterested in comparingthemeasured and modeledcharacteristics.

Seznam použitého značení:

$A_{VS}$	průtokový součinitel	$[m^2]$
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	konstanty modelu	$[-]$
$C_{VS}$	průtokový součinitel	$[gal/min]$
DN	jmenovitá světlost	$[mm]$
$D_{\omega}$	příčná difuze	$[-]$
$G_b$	generace kinetické turbulence	$[N]$
$G_k$	generace kinetické turbulence	$[N]$
H	zdvih kuželky	$[mm]$
$H_0$	minimální zdvih kuželky	$[mm]$
$H_{MAX}$	maximální zdvih kuželky	$[mm]$
Q	objemový průtok	$[m^3/h]$
$S_k, S_\varepsilon$	zdrojové členy	$[-]$
$Y_M$	příspěvek fluktujících dilatací	$[-]$
$f_X, f_Y, f_Z$	složky vnějšíobjemové síly	$[N]$
$k_V$	průtokový součinitel	$[m^3/h]$
$k_{VR}$	nejmenší průtokový součinitel	$[m^3/h]$
m, n	sklon charakteristiky	$[-]$
$p_v$	autorita ventilu	$[-]$
p	tlak	$[Pa]$
$p_{V100}$	tlaková ztráta ventilu při plném otevření	$[Pa]$
$p_{V0}$	tlaková ztráta ventilu při plném uzavření	$[Pa]$
r	regulační poměr	$[-]$
u,v, w	složky rychlosti	$[m/s]$
$\Phi$	poměrný průtokový součinitel	$[-]$

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$	inverzní efektivní Prantlová čísla	[-]
$\Delta p$	tlaková ztráta např. armatury	[Pa]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_0$	hustota při 15°C	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\zeta$	součinitel místního odporu	[-]

## **Obsah**

1	Úvod .....	6
2	Armatury.....	7
2.1	Definice armatury.....	7
2.2	Rozdělení potrubních armatur .....	7
2.3	Rozdělení regulačních ventilů .....	7
2.4	Regulační armatura.....	8
2.5	Nejdůležitější normy pro regulační ventily.....	9
2.6	Pohony regulačního ventilu.....	9
2.6.1	Elektromechanické pohony .....	9
2.6.2	Pneumatický pohon .....	10
2.6.3	Hydropohon.....	10
2.6.4	Elektrohydraulický pohon .....	10
3	Návrh regulačního ventilu .....	11
	Základní veličiny pro návrh regulačního ventilu .....	12
	DN.....	12
	PN.....	12
	Maximální pracovní teplota.....	12
	Průtokový součinitel.....	12
3.1	Autorita ventilu $p_v$ .....	14
3.1.1	Vliv autority na deformaci průtočné charakteristiky.....	15
3.2	Charakteristiky ventilů .....	16
3.3	Typy charakteristik.....	17
	Lineární charakteristika.....	17
	Rovnoprocentní charakteristika.....	17
	Parabolická průtočná charakteristika .....	19
3.4	Regulační poměr .....	19
4	Problematika regulačních ventilů .....	20
4.1.1	Flashing .....	20
4.1.2	Kavitace.....	21
4.1.3	Hluk.....	22
5	Zkušební postupy pro regulační ventil .....	23
5.1	Zkušební vzorek .....	23
5.2	Zkušební úsek.....	23
5.3	Nastavovací armatura .....	25



5.4	Zkušební tekutiny .....	25
5.5	Montáž zkušební vzorku .....	25
5.6	Měřené veličiny .....	25
	Průtok .....	25
	Tlak .....	26
	Teplota .....	26
	Zdvih kuželky .....	26
5.7	Průběh zkoušky .....	27
	Schéma zkušební obvodu .....	27
5.8	Zkušební obvod .....	28
5.9	Prvky obvodu .....	28
	Průtokoměr .....	28
	Nastavovací armatury .....	29
	Tlakové senzory .....	29
	Měřicí systém .....	29
	Čerpadlo .....	29
	Potrubí .....	29
	Mechanické spojky .....	29
5.10	Postup zkoušky .....	29
5.11	Naměřená data .....	30
	Vyhodnocení měření .....	31
6	Matematické modelování .....	32
6.1	DNS .....	33
6.2	LES .....	34
6.3	RANS .....	34
	6.3.1 k- $\epsilon$ standart .....	34
	6.3.2 k- $\epsilon$ RNG .....	35
	6.3.3 k- $\omega$ standart .....	36
	6.3.4 k- $\omega$ SST .....	36
6.4	Konstrukční model ventilu .....	37
6.5	Tvorba sítě .....	38
	6.5.1 Nastavení sítě .....	40
	6.5.2 Zjemnění sítě .....	40
6.6	Nastavení Fluentu .....	42
	6.6.1 General .....	42

6.6.2	Models.....	42
6.6.3	Materials.....	42
6.6.4	Okrajové podmínky .....	43
6.6.5	Nastavení ostatních parametrů.....	43
6.7	Vyhodnocení matematické modelace .....	43
6.8	Grafické vyhodnocení simulace .....	45
6.8.1	Statické tlaky .....	46
6.8.2	Statický tlak v XY grafu .....	47
6.8.3	Rychlosti proudění.....	48
6.9	Charakteristika regulačního ventilu .....	50
7	Závěrečné shrnutí .....	51

## 1 Úvod

Problematika regulačních ventilů je velmi rozsáhlá a závislá na médiu, pro které se bude ventil používat. Pracovní médium použité v diplomové práci je voda.

Lidstvo využívá vody jako pracovního média již od nepaměti. Ostatně už ve středověkých mlýnech uvidíte mlýnské kolo poháněné vodou, nebo stavidlo v rybníce, které by mohlo být pokládáno za jeden z prvních ventilů na řízení průtoku.

Nutnost řízení průtoku zřejmě není třeba vysvětlovat, přece jenom každý z nás několikrát denně použije vodovodní kohoutek, což je jeden z typických příkladů řízení průtoku změnou průtočné plochy. Dalo by se říci, že základní myšlenka těchto ventilů je možnost libovolně regulovat průtok.

Způsoby regulace průtoku jsou různé, ať už jsou to regulační ventily použité v hydraulickém obvodu nebo regulační čerpadlo, které reguluje průtok, téměř vždy jde o princip změny průtočné plochy.

Avšak ani tato metoda není bezproblémová, konkrétně u ventilů se řeší několik problematik.

### a) Flashing

Odborně řečeno jedná se o poškození ventilu vlivem eroze.

### b) Kavitace

Při kavitaci dochází k implozi vzduchových bublin a jelikož se tak děje v blízkosti pevných povrchů. Tak dochází k vylamování materiálu ventilu. Více viz diplomová práce Bc. Jana Pavelčáka (2014).

### c) Hluk

Hluk na ventilu tvoří vibrace, které mohou poškodit samotný ventil nebo velmi často poškodí zařízení řazené na výstupním potrubí. Hluk je signálem kavitace.

Abychom všechny tyto problémy mohli odstranit je nejprve nutné vědět, co se v takovém ventilu děje. K tomu je matematické modelování ideální prostředek. Obzvlášť pokud je jako v mém případě doplněn o laboratorní měření.

## 2 Armatury

### 2.1 Definice armatury

Jedna z možných definic zní: „Armatura umožňuje řídit průtok tekutin nebo jejich tlak a tak ovládat trubní řády, sítě i hydraulické mechanismy“.[2]

### 2.2 Rozdělení potrubních armatur

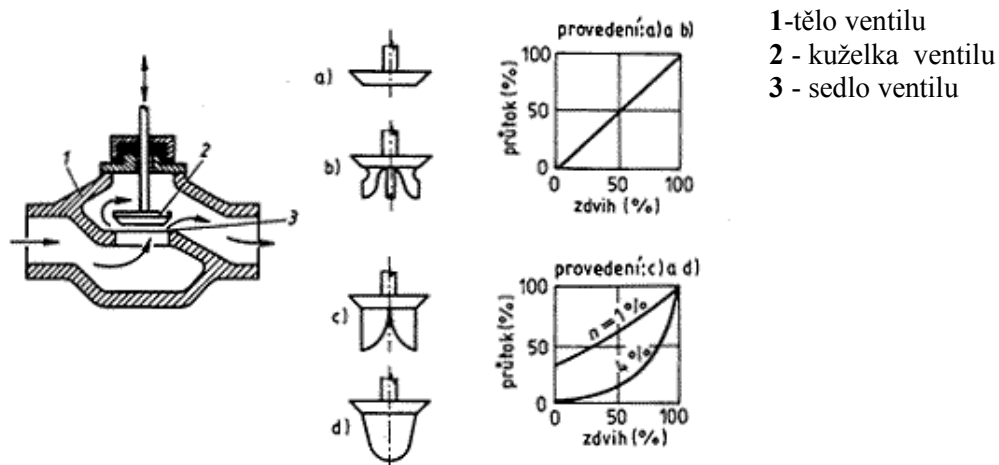
Armatury dělíme podle několik kritérií např. dle funkce na:

- uzavírací – šoupátko, ventil, kulový kohout, klapka
- regulační – ventil, šoupátko, kulový kohout
- pojistná – ventil
- zpětná – klapka
- směšovací

dle uzavíracího pohybu na:

- lineární (šoupátka, ventily)
- otáčením (kulový kohout, uzavírací klapka)
- detonací (membránová armatura)

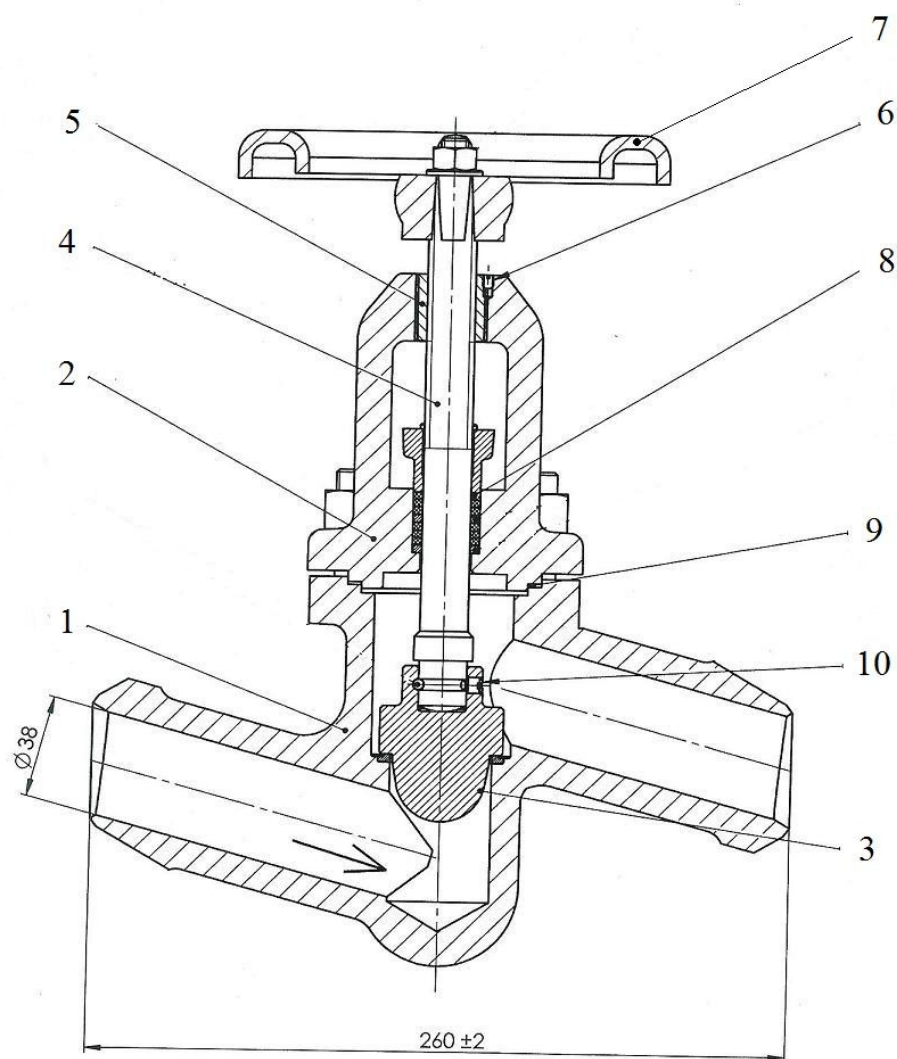
### 2.3 Rozdělení regulačních ventilů



Obr.2.1 Princip funkce ventilu a nejběžnější tvary kuželek

- a) talířová kuželka s kónickými dosedacími plochami*
- b) talířová kuželka s usměrňujícími žebry*
- c) kuželka s logaritmickými vstupy*
- d) kuželka s logaritmickým nátokovým profilem [11]*

## 2.4 Regulační armatura



Obr.2.2 Měřený regulační ventil VG40 PN160 firmy Armatury Group a.s.

- |    |                              |
|----|------------------------------|
| 1  | Spodní těleso ventilu        |
| 2  | Horní těleso ventilu         |
| 3  | Kuželka                      |
| 4  | Vřeteno                      |
| 5  | Vřetenová matice             |
| 6  | Kolik vřetenové matice       |
| 7  | Ruční kolo                   |
| 8  | Těsnění ucpávky              |
| 9  | Těsnění horního dílu ventilu |
| 10 | Kuželkový čep                |

Regulační ventily regulují průtok tekutiny v průtočném kanálu změnou průtočné plochy, která se mění na základě nastavení zdvihu šoupátka.

Regulační ventily se provozují v mezípolohách  $H_0$  až  $H_{MAX}$  přičemž se těsnost v nulovém zdvihu nepožaduje a ani nepředpokládá, jsou tudíž opakem uzavíracích ventilů, které mají za úkol dokonale těsnit v poloze zavřeno a mít minimální tlakové ztráty v poloze otevřeno.[2]

Poměrně často se však stává, že se průtok reguluje právě uzavíracími ventily. To způsobuje nežádoucí vibrace v systému a také větší opotřebení uzavíracího ventilu.

## **2.5 Nejdůležitější normy pro regulační ventily[2]**

ČSN EN 60534-1

Regulační armatury pro průmyslové procesy. Část 1: Terminologie a všeobecné požadavky.

ČSN EN 60534-2-2

Regulační armatury pro průmyslové procesy. Část 2: Průtok. Oddíl druhý: Výpočtové podklady pro průtok stlačitelných tekutin v provozních podmínkách.

ČSN EN 60534-2-3

Regulační armatury pro průmyslové procesy. Část 2: Průtok. Oddíl třetí: Zkušební metody.

ČSN 13 4509-5

Metodika měření regulačních ventilů. Průtočné charakteristiky.

ČSN 13 4509-2

Metodika měření regulačních ventilů. Výpočtové vztahy pro průtok nestlačitelných tekutin.

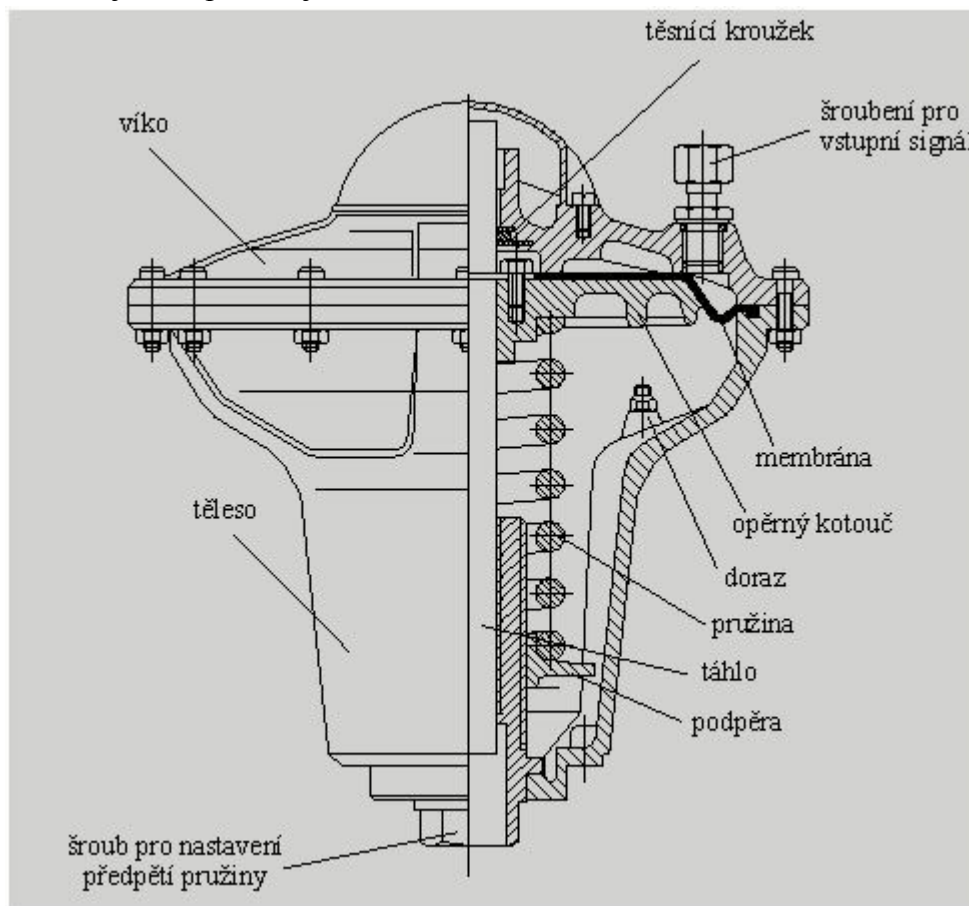
## **2.6 Pohony regulačního ventilu**

### **2.6.1 Elektromechanické pohony**

- jsou nejrozšířenější,
- jejich základním prvkem je jednofázový nebo stejnosměrný elektromotor,
- je nutné použít převodovku,
- mají poměrně složité provedení, tudíž i nákladné,
- není vhodno realizovat ve výbušném prostředí,
- mají připojovací rozměry normalizovány.

### 2.6.2 Pneumatický pohon

- Má jednoduché a levné provedení,
- Tlak ovládacího vzduchu je do 0,6 MPa,
- Přestavení orgánu nastává s určitou prodlevou,
- Mají sklon k překmitnutí za žádoucí polohu regulačního signálu (nutno použít pozicionér)
- Nejčastější provedení je s vratnými pružinami viz obr.2.3
- Provedení jsou např.: dvojčinné membránové, atd.



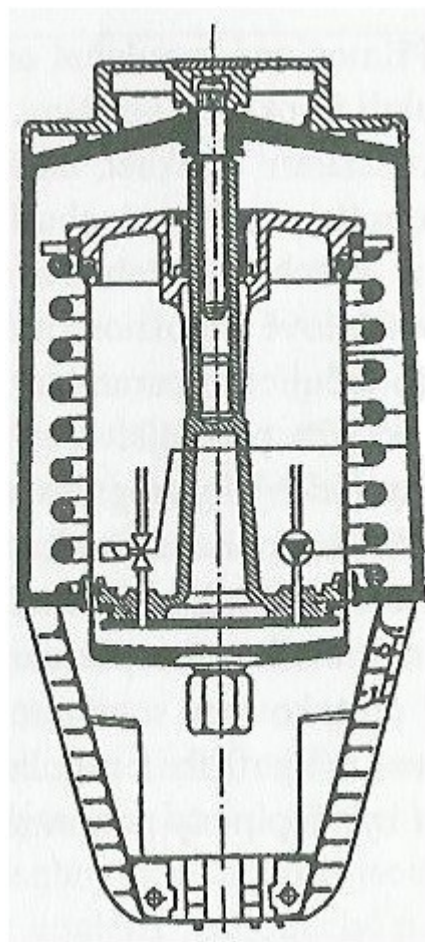
Obr.2.3 Řez s popisem pneumopohonu [12]

### 2.6.3 Hydropohon

- je tvrdý zdroj ovládání,
- provedení jako pístové jednočinné nebo dvojčinné,
- pracovní látka je olej,
- použití spíše na ústupu.

### 2.6.4 Elektrohydraulický pohon

- Jedná se o kombinace elektrického a hydraulického pohonu
- Je výkonný pohon
- Obsahuje miniagregát, kde je čerpadlo vibrační nebo zubové[2]



*Obr.2.4Řez elektrohydraulickým pohonem [5]*

### **3 Návrh regulačního ventilu[7][8][9][10][11]**

Dříve než přejdu k obecným zásadám návrhu regulačního ventilu chci zmínit, že pro návrh těchto ventilů existuje celá řada softwaru jak zpoplatněný tak i volně dostupných. Tyto softwary značně zjednodušují práci při navrhování. Jedním z těchto softwaru je například program Divent, který lze nalézt na stránkách firmy Polnacorp.[18]

Aby regulační ventily plnily správně svou funkci, musejí mít vlastnosti vhodné pro dané použití. Vlastnosti ventilu jsou dány především jeho konstrukcí, tj. průtočným průřezem, tvarem průtočných cest a kuželky, ale rovněž vlastnostmi ovládacího pohonu ventilu.



## **Základní veličiny pro návrh regulačního ventilu**

### **DN**

Označují nominální světlost vstupního a výstupního hrdla. Udává se v milimetrech. Používá se většinou menší světlost než je světlost připojeného potrubí je to výhodné především u náročných aplikací.

### **PN**

Řadí ventil do tlakové třídy. Jedná se, o nominální tlak ve většině případu souhlasí s maximálním pracovním přetlakem armatury. Při vyšších teplotách však může tato hodnota klesnout až na zlomek PN. Přípustné hodnoty udávají příslušné normy.

### **Maximální pracovní teplota**

Jedná se o teplotu média, jejichž maximální hodnota je stanovena výrobcem. Bývá zpravidla omezena součástmi v armatuře, jako jsou např. ucpávky, těsnění atd.

### **Průtokový součinitel**

Jedná se o součinitel typický pro regulační armatury. Jeho velikost udává průtok danou armaturou při daném zdvihu pomocí průtokového součinitele je možné spočítat tlakovou ztrátu na armatuře. Běžně se používají součinitele  $k_{vs}$  (Evropa),  $A_{vs}$  a  $C_{vs}$ . Označením  $k_{vs}$  jsou označovány součinitele  $k_v$  při jmenovitém (100%) otevření ventilu. Pro výpočet  $k_v$  hodnoty při jiné teplotě než je voda se používá následující vztah:

$$k_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_o}{\Delta p_v}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (3.1)$$

kde:

- $\rho$  hustota teploty látky při provozní teplotě [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\rho_o$  hustota vody při teplotě 15 °C [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\Delta p_v$  je tlaková ztráta armatury [Pa]
- $\Delta p_o$  je atmosférický tlak [Pa]

$$k_v = \frac{1}{100} \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (3.2)$$

kde:

- $Q$  je objemový průtok armaturou [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- $\rho$  je objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\Delta p$  je tlaková ztráta armatury [MPa]

Pro vodu lze tento vztah zapsat jako:

$$k_V = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (3.3)$$

kde:

$Q$  je objemový průtok armaturou [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$\Delta p$  je tlaková ztráta armatury [bar]

V USA se počítá s hodnotou označovanou jako  $C_{vs}$ , která je zjišťována stejným způsobem při tlakové ztrátě na ventilu 1 psi ( $\Delta p_0 = 1 \text{ lb/sq} = 6,8948 \text{ kPa}$ ) a průtok je v gal/min. Hustota je dosazována v  $\text{lb/ft}^3$  ( $1 \text{ lb/ft}^3 = 16,018 \text{ kg/m}^3$ ).

Dříve se u nás užívalo označení  $A_{vs}$  jedná se prakticky o stejný význam tohoto součinitele jako  $k_{vs}$ . Definiuje vlastnosti armatury. Vychází z upravené Bernoulliho rovnice.

$$A_{vs} = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_v}} \quad (3.4)$$

kde:

$Q$  je objemový průtok ventilem [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p_v$  tlaková ztráta ventilu [Pa]

$\rho$  hustota vody [ $\text{kg/m}^3$ ]

Přepočet jednotlivých hodnot vypadá následovně:

$k_{vs} = 36000 \cdot A_{vs}$	[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$k_{vs} = 0,865 \cdot C_{vs}$	[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$C_{vs} = 41700 \cdot A_{vs}$	[gal/min]
$C_{vs} = 1,17 \cdot k_{vs}$	[gal/min]
$A_{vs} = 2,40 \cdot 10^{-5} \cdot C_{vs}$	[ $\text{m}^2$ ]
$A_{vs} = 2,78 \cdot 10^{-5} \cdot k_{vs}$	[ $\text{m}^2$ ]

Tab.3.1 Přepočet průtokového součinitele [9]

Mezi  $k_v$  hodnotou, volným průtočným průřezem přípojovacího potrubí ventilu  $S$  [ $\text{mm}^2$ ] a součinitelem místního odporu ventilu  $\zeta$  [-] existují následující vztahy:

$$k_v = 0,009 \cdot \pi \cdot DN^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\zeta}} \quad (3.5)$$

$$\xi = 2 \cdot \left( \frac{0,009 \cdot \pi \cdot DN^2}{k_v} \right)^2 \quad (3.6)$$

Koeficient 0,009 zahrnuje převod jednotek, při úvaze počátečních podmínek ( $p_0, \Delta p_0$ ) viz rovnice (3.1).

### 3.1 Autorita ventilu $p_v$

Autorita ventilu (také poměrná tlaková ztráta ventilu nebo vlivnost ventilu) v potrubní soustavě zavádí jako poměr dispozičního tlaku na ventilu při plném průtoku media (při zcela otevřeném ventilu) ku dispozičnímu tlaku při nulovém průtoku (při zcela uzavřeném ventilu).

Podstatný vliv na regulační schopnost ventilu umístěného v potrubní síti má autorita ventilu. Obecně lze konstatovat, že čím je větší autorita ventilu, tím lepší je regulační schopnost ventilu v potrubní síti.

Autorita ventilu  $p_v$  je definována poměrem tlakové ztráty ventilu při plném otevření ku tlakové ztrátě ventilu při plném uzavření.

$$p_v = \frac{\Delta p_{v100}}{\Delta p_{v0}} \quad (3.7)$$

kde:

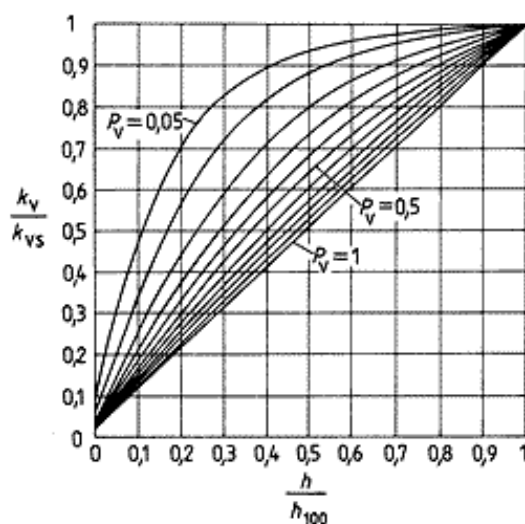
$\Delta p_{v100}$  tlaková ztráta ventilu při plném otevření [Pa]

$\Delta p_{v0}$  tlaková ztráta ventilu při plném uzavření [Pa]

$p_v$  autorita ventilu [-]

Podle toho, jakou má ventil tlakovou ztrátu vzhledem k tlakové ztrátě potrubní sítě okruhu příslušejícího ventilu, resp. jak velká je autorita ventilu, se statická charakteristika ventilu deformuje. Deformaci statické charakteristiky ventilu s lineární, rovnoprocentní a parabolickou charakteristikou v závislosti na autoritě ventilu viz obr. 3.1, 3.2, 3.3.

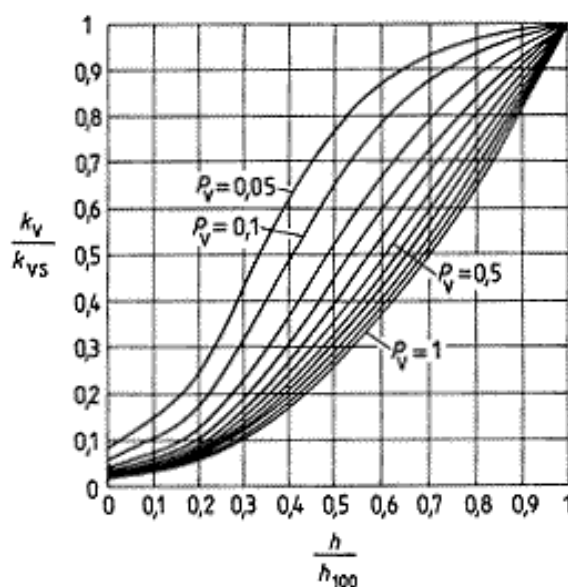
### 3.1.1 Vliv autority na deformaci prutočné charakteristiky



Obr.3.1 Deformace lineární statické charakteristiky ventilu se změnou autority ventilu [8]

Rovnice poměrného průtoku pro ventil s lineární charakteristikou v závislosti na autoritě a jeho poměrném zdvihu.

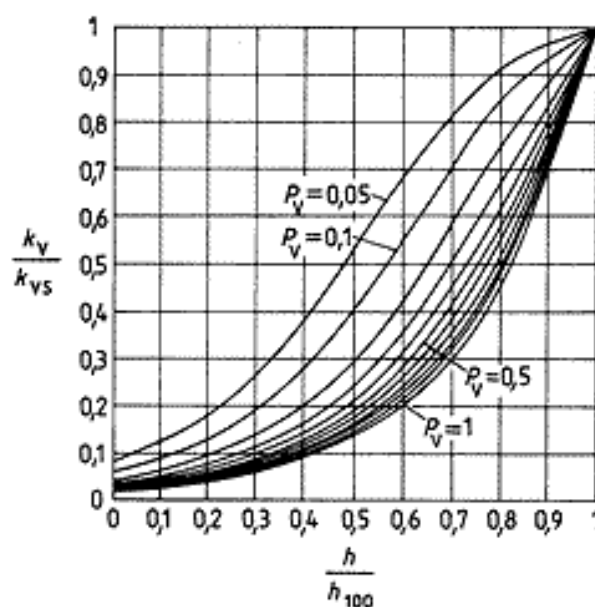
$$\Phi_c = \sqrt{\frac{1}{1 + P_V \cdot \left( \frac{1}{\left( 0,0183 + 0,9817 \cdot \left( \frac{H}{H_{100}} \right)^2} - 1 \right)} \right)}} \quad (3.8)$$



Obr.3.2 Deformace parabolické statické charakteristiky ventilu se změnou autority ventilu [8]

Rovnice poměrného průtoku pro ventil s parabolickou charakteristikou v závislosti na autoritě a jeho poměrném zdvihu.

$$\Phi_C = \sqrt{\frac{1}{1 + P_V \cdot \left( \frac{1}{\left(0,0183 + 0,9817 \cdot \left(\frac{H}{H_{100}}\right)^2\right)^2} - 1 \right)}} \quad (3.9)$$



Obr.3.3 Deformace rovnoprocenní statické charakteristiky ventilu se změnou autority ventilu [8]

Rovnice poměrného průtoku pro ventil s rovnoprocenní charakteristikou v závislosti na autoritě a jeho poměrném zdvihu.

$$\Phi_C = \sqrt{\frac{1}{1 + P_V \cdot \left( \frac{1}{\left(0,0183 \cdot e^{\left(4 \cdot \frac{H}{H_{100}}\right)}\right)^2} - 1 \right)}} \quad (3.10)$$

### 3.2 Charakteristiky ventilů

Poměrný průtokový součinitel  $\Phi$ , který je definován poměrem okamžitého průtokového součinitele  $k_V$  ku jmenovitému průtokovému součiniteli  $k_{VS}$

$$\Phi = \frac{k_V}{k_{VS}} \quad (3.11)$$

Průtočná charakteristika je definována jako funkční závislost průtokového součinitele na poloze uzavěru regulačního prvku.

Poměrná průtočná charakteristika je funkční závislost poměrného průtokového součinitele na poměrné poloze uzavěru regulačního prvku  $H$ , který je dán poměrem okamžitého zdvihu armatury  $H_{ku}$  jejímu jmenovitému zdvihu  $H_{MAX}$ .

### 3.3 Typy charakteristik

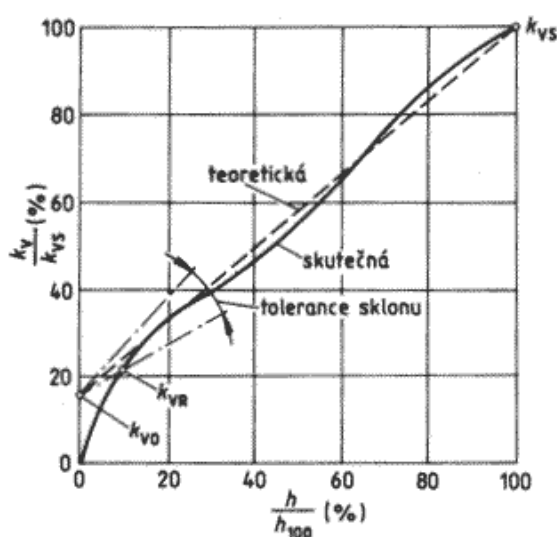
#### Lineární charakteristika

Tak zvaně ideální průtočná charakteristika. Princip spočívá v tom že, stejný přírůstek zdvihu znamená stejný přírůstek průtokového součinitele  $\Phi$ .

$$\Phi = \Phi_0 + m \cdot H \quad (3.12)$$

kde:

- $\Phi_0$  je poměrný průtokový součinitel při zdvihu  $H=0$
- $m$  je sklon charakteristiky
- $H$  je zdvih kuželky



Obr.3.4 lineární charakteristika [10]

#### Rovnoprocentní charakteristika

Ideální rovnoprocentní průtočná charakteristika regulační armatury je taková, ve které stejné přírůstky poměrného zdvihu  $H$  vyvolají stejné procentuální přírůstky poměrného průtokového součinitele  $\Phi$ .

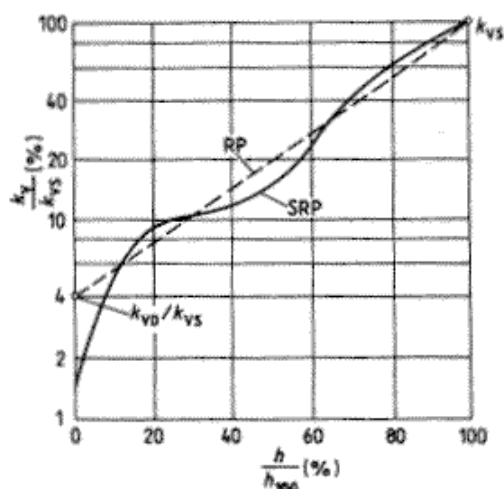
$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{n \cdot H} \quad (3.13)$$

kde:

$\Phi_0$  je průtokový součinitel při zdvihu  $H=0$

$n$  je sklon rovnoprocentní charakteristiky vynesené v souřadnicích  $H-\ln \Phi$

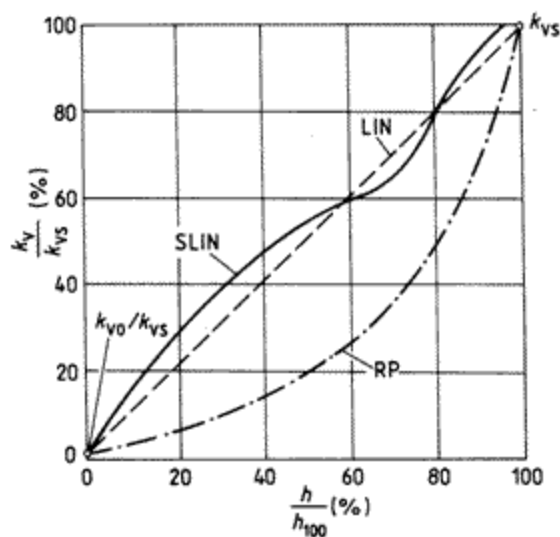
$h$  je zdvih kuželky



Obr.3.5 Příklad rovnoprocentní statické charakteristiky [10]

RP - rovnoprocentní statická charakteristika teoretická

SRP - rovnoprocentní statická charakteristika skutečná



Obr.3.6 Příklad lineární a rovnoprocentní statické charakteristiky s  $\phi = 4\%$  [10]

LIN - lineární statická charakteristika teoretická

SLIN - lineární statická charakteristika skutečná

RP - rovnoprocentní statická charakteristika teoretická

### Parabolická průtočná charakteristika

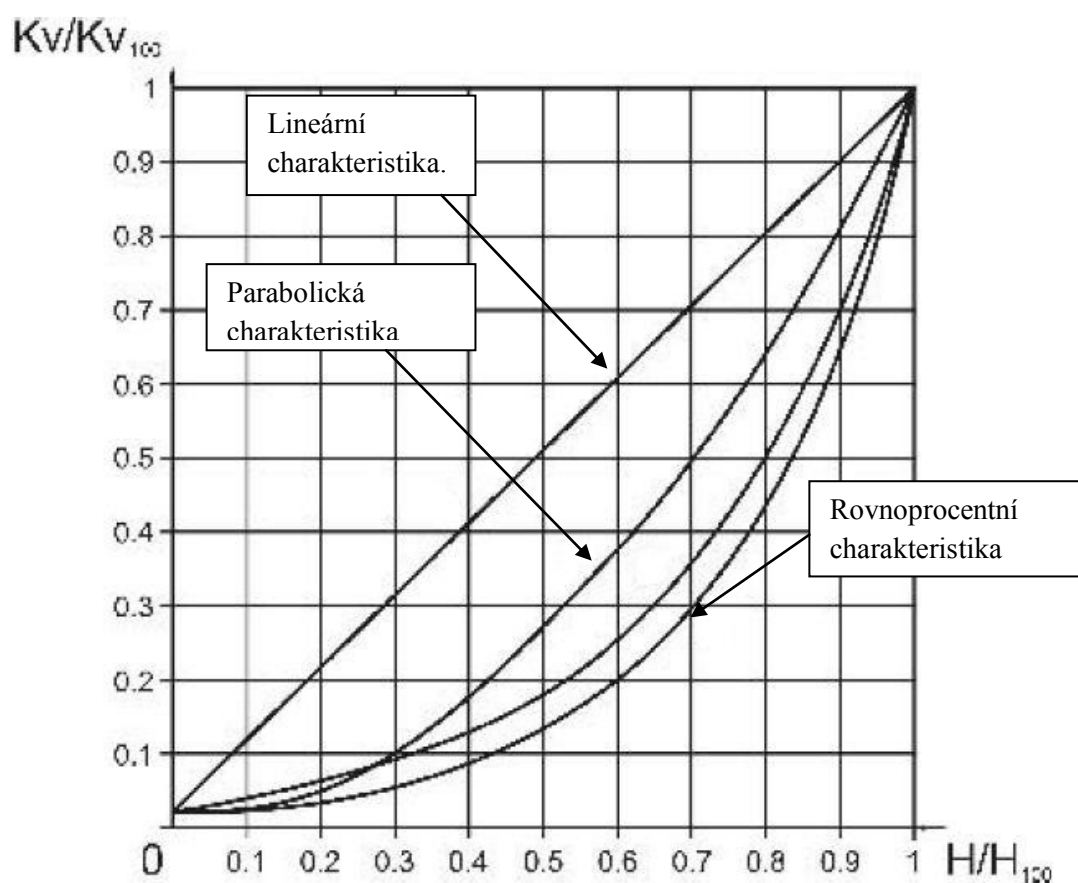
Jedná se o ne příliš používanou charakteristiku. Jde vlastně o kompromis mezi lineární a rovnoprocentní charakteristikou.

$$\Phi = \Phi_0 + n \cdot h^2 \quad (3.14)$$

kde:

$\Phi_0$  je průtokový součinitel při zdvihu  $h=0$

$n$  je sklon parabolické charakteristiky vynesené v souřadnicích  $h^2 - \Phi$



Obr.3.7 Ukázka průtokových charakteristik [7]

### 3.4 Regulační poměr

Je definován jako poměr největšího průtokového součinitele  $k_{vS}$  ku nejmenšímu průtokovému součiniteli  $k_{vR}$

$$r = \frac{k_{vS}}{k_{vR}} \quad (3.15)$$



Teoretický regulační poměr při ideální průtočné charakteristice.

$$r_{teor} = \frac{1}{\Phi_0} \quad (3.16)$$

U reálného ventilu je regulační poměr dán zejména vlastnostmi ovládání, tedy pohonu. Vzhledem k parametrům moderních pohonů bývá praktický regulační poměr více než 2x vyšší než regulační poměr teoretický vycházející jen z rovnice charakteristiky armatury.

#### **4 Problematika regulačních ventilů [15][16]**

Problematika regulačních ventilů a jejich řešení není téma této diplomové práce, proto se zde nebudu příliš rozepisovat. Pouze nastíním důvody vzniku daných problémů a jejich možné řešení.

##### **4.1.1 Flashing**

Jedná se o problém velice podobný kavitaci. Flashing vzniká, jestliže tlak  $p_2$  na výstupu se dostane vlivem zvýšené rychlosti při škrcení do oblasti nasycených par dané kapaliny. Pak dochází k tvorbě bublin, čím více klesá tlak  $p_2$  tím rychlejší je tvorba bublin. Všimněte si, že doposud je průběh stejný jako u kavitace. Na rozdíl od kavitace však o flashingu mluvíme, pokud tlak  $p_2$  zůstává trvale pod hodnotou nasycených par. Vlivem flashingu dochází k erozi a tím poškození ventilu. Viz obr. 4.1.



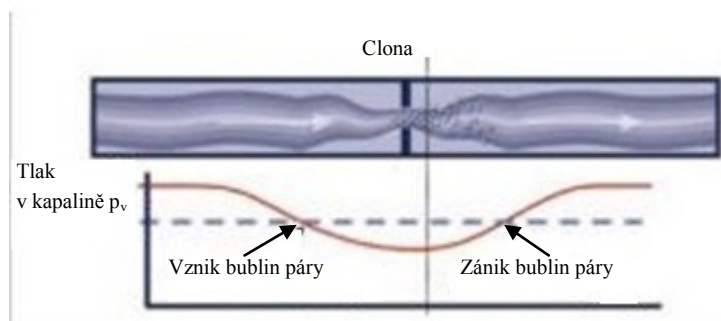
*Obr. 4.1 Kuželka ventilu poškozená flashingem [17]*

## Opatření

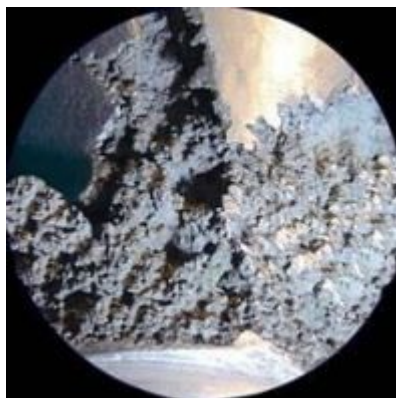
Flashingu lze předejít vhodně zvolenou konstrukcí ventilu. V některých literaturách doporučují volburohového ventilu s vystýlkou na vstupní hraně nebo ventil s redukovaným trimem. V podstatě jde o správný výběr tvrzeného materiálu jak tělesa, tak kuželky ventilu.

### 4.1.2 Kavitace

Kavitace vzniká velice podobně jako flashing, avšak o kavitaci mluvíme, pokud se tlak pod hodnotou nasycených par nedrží dlouho a pak opět klesá, čímž se ztrácejí (implodují) vzniklé bubliny, viz obr. 4.2. Bohužel k tomuto jevu dochází často v blízkosti pevných povrchů materiálu a vlivem vzniku mikrotrysek a rázových vln poškozují materiál, viz obr.4.3.



Obr.4.2 Průběh vzniku kavitace [17]



Obr.4.3 Kuželka ventilu poškozená kavitací [17]

### **Opatření:**

Problematika kavitace je velice rozsáhlá a nedá se s přesností říct jaké opatření je nejlepší. Liší se to případ od případu. S určitostí lze však říci že použití tvrzených materiálů zmírňuje účinek kavitace. Dále bylo zjištěno, že nejlepší odolnost proti kavitačnímu poškození měly přímé ventily vybavené vícestupňovou klecí.

#### **4.1.3 Hluk**

Hluk v regulačních ventilech zapříčiňují Reynoldsova napětí při turbulentním proudění. Vzhledem k tomuto faktu můžeme vyzorovat, že hluk je problematikou regulačních ventilů pracujících spíše s párou nebo plyny. Zdrojem hluku mohou být např.: překážky v průtočné cestě, rychlá expanze nebo zpomalení proudícího média. Hluk tvoří problém pouze tehdy, projde-li přes stěnu ventilu do okolí.

### **Opatření**

Používá se dvojí metody na snížení hluku.

- Sníží se rychlost proudění uvnitř ventilu
- Zvýší se frekvence generovaného hluku. Hluk s vyšší frekvencí má totiž tendenci putovat podél potrubí a jeho stěnou neproniká tak snadno.

Vhodným příkladem konstrukce regulačního ventilu na snížení hluku je vložka typu FisherWhisperFlo od firmy Emerson viz obr. 4.4.

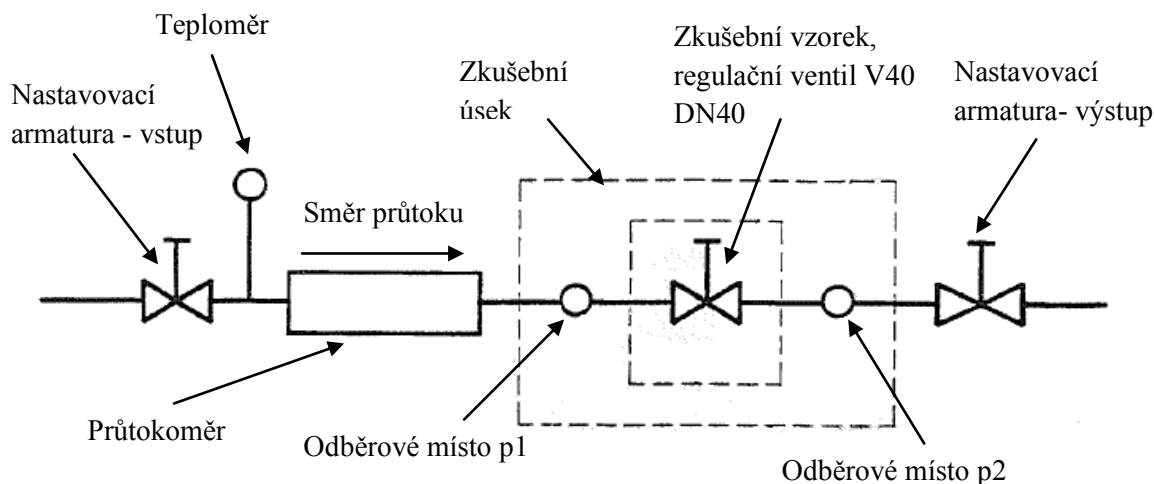


*Obr. 4.4 Vložka FisherWhisperFlo [17]*

## 5 Zkušební postupy pro regulační ventil[4]

Při zkoušení regulačního ventilu vycházíme z normy ČSN EN 60534-2-3 (Regulační armatury pro průmyslové procesy), kterou jsem měl k nahlédnutí.

Podle této normy byl sestaven zkušební vzorek a přizpůsoben pro zkoušku v laboratořích VŠB-TUO, viz obr. 5.6.



Obr.5.1 Schéma zapojení zkušebního vzorku dle normy [4]

### 5.1 Zkušební vzorek

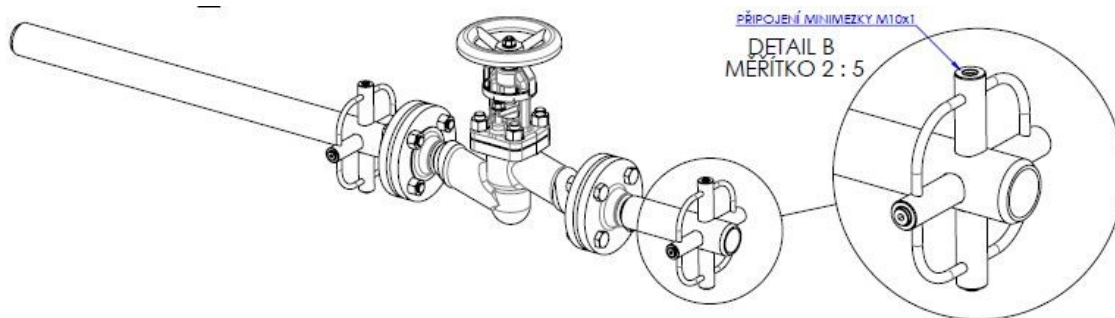
Dle normy je zkušební vzorek jakákoli armatura nebo kombinace armatur s konfuzory, difuzory nebo dalšími zařízeními pro které se požadují výsledky zkoušek.

### 5.2 Zkušební úsek

Zkušební úsek dodala firma Armatury Group a.s. spolu s doplněnými odběrnými místy viz obr. 5.2.

Dle normy se zkušební úsek skládá ze dvou přímých trubek. Jmenovitá světlost trubek na vstupu a na výstupu zkušebního úseku musí odpovídat jmenovité světlosti připojení zkušebního vzorku.

Pro zajištění přesného měření tlaku byla vytvořena odběrná místa viz obr. 5.2.



Obr.5.2 Obrázek zkušebního úseku[4]

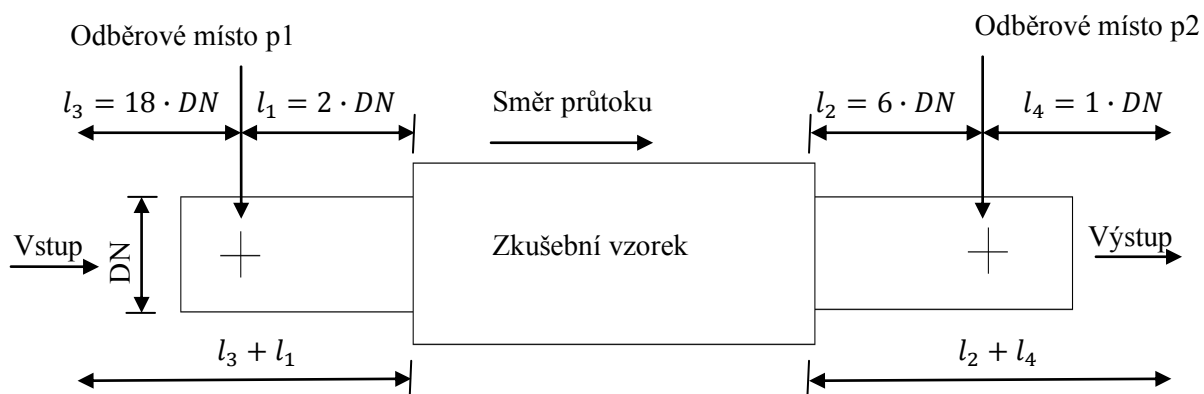
Délky potrubí tkušebního úseku jsou popsány normou. To je důvod proč je vstupní potrubí zkušebního vzorku o tolik delší než výstupní.

Dle normy existují poznámky upravující délky potrubí podle potřeby:

Poznámka první: Usměřovače proudu mohou být použity tam, kde je to účelné. Jestliže jsou užity, délka  $l_3$  může být redukována na nejméně osminásobek jmenovité světlosti.

Poznámka druhá: Umístění tlakových odběrů je ve vstupním a výstupním proudu zkušební vzorku jako celku. Zkušební vzorek může být samostatná regulační armatura nebo regulační armatura v jakékoli kombinaci s připojenými přidavnými zařízeními.

Poznámka třetí: Jestliže se zdroj porušení proudu na vstupu skládá ze dvou ohybů v různých rovinách za sebou, rozměr  $l_3$  musí být větší, než osminásobek jmenovité světlosti potrubí, pokud nejsou použity usměřovače proudu.



Obr.5.3Schéma délek zkušebního úseku [4]

### 5.3 Nastavovací armatura

Nastavovací armatura na vstupu se používá k nastavení vstupního tlaku do zkušebního úseku. Nastavovací armatura na výstupu slouží k nastavení během zkoušky. Společně se obě armatury používají k nastavení tlakové spádu mezi vstupním a výstupním tlakovým odběrem a k udržení požadovaného výstupního tlaku. Při použití tekutiny jako testovací látky musí být zabráněno k odpařování látky na vstupu.

### 5.4 Zkušební tekutiny

Zkušební tekutiny dělíme na stlačitelné a nestlačitelné. Pokud měříme s nestlačitelnou tekutinou pak v dle normy musíme použít vodu v rozmezí teplot od 5°C do 40°C. Pokud měříme se stlačitelnou tekutinou, pak dle normy použijeme vzduch nebo jinou stlačitelnou tekutinu přičemž nasycená pára není jako zkušební látka dovolena.

V našem případě se jednalo o vodu o teplotě cca 16°C. Vlivem koroze nádrže a nečistot se jednalo o zcela čistou vodu avšak tento fakt jsme zanedbali.

### 5.5 Montáž zkušební vzorku

Souosost mezi osou zkušební vzorku a osou vstupního a výstupního hrdla je dána tabulkou.

Jmenovitá světlost trubky	Dovolená nesouosost
DN 15 a DN 25	0,8 mm
DN 32 až DN 150	1,6 mm
DN 200 a větší	0,01 jmenovité světlosti trubky

*Tab.5.1 Tolerance nesouososti [4]*

### 5.6 Měřené veličiny

#### Průtok

Průtokoměr může být umístěn před nebo za zkušebním úsekem a může být jakéhokoliv druhu, pokud docílí předepsanou přesnost. V našem případě jsme umístili průtokoměr před zkušební úsek. Stanovujeme okamžitý střední průtok a přípustnou mezní úchylkou  $\pm 5\%$  od skutečné hodnoty.

## **Tlak**

Měříme statický relativní tlak, proto může nabývat záporných hodnot.

Tlak  $p_1$  a  $p_2$  měříme v tlakových odběrech umístěných před a za zkušebním vzorkem, viz obr. 5.2. Pokud rozložení rychlostí není rovnoměrné, můžeme použít více tlakových odběrů.

Průměry tlakových odběrů na vstupu a na výstupu musí být stejné. V žádném případě nesmí žádná část vyčnívat dovnitř potrubí.

Osy tlakových odběrů musí být umístěny vodorovně (nestlačitelná i stlačitelná) nebo svisle nad trubkou (stlačitelná) v závislosti na použité tekutině.

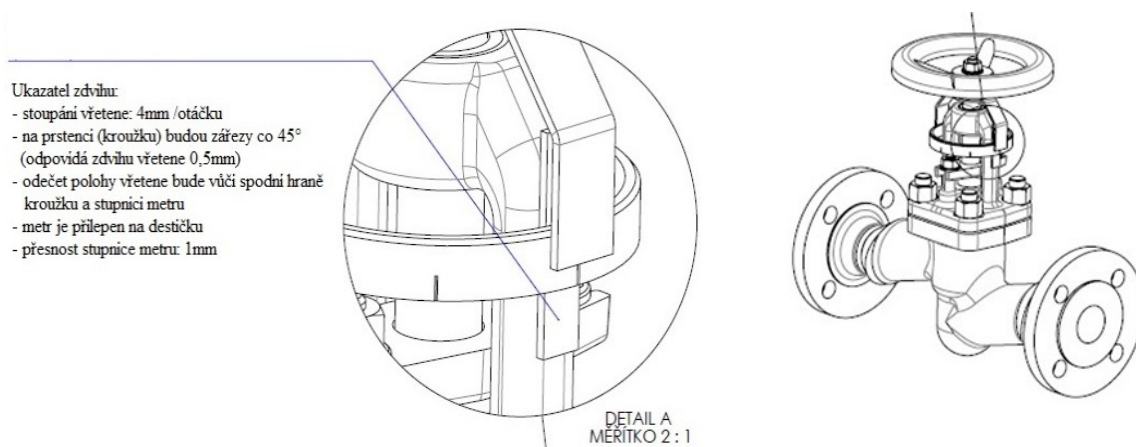
Všechna měření tlaků a tlakových diferencí musí být s přesností  $\pm 2\%$  naměřené hodnoty.

## **Teplota**

Teplota tekutiny se měří na vstupu a musí být měřena s přesností  $\pm 1^\circ\text{C}$

## **Zdvih kuželky**

Dle normy se zdvih kuželky se měří s přesností mezní úchylkou  $\pm 0,5\%$  jmenovitého zdvihu. V našem případě jsme byli schopni určit zdvih kuželky s přesností  $\pm 0,2\text{mm}$  díky systému odečítání rysek, který připravili konstruktéři Armatury Group a.s.



Obr. 5.4 Ukazatel zdvihu

## 5.7 Průběh zkoušky

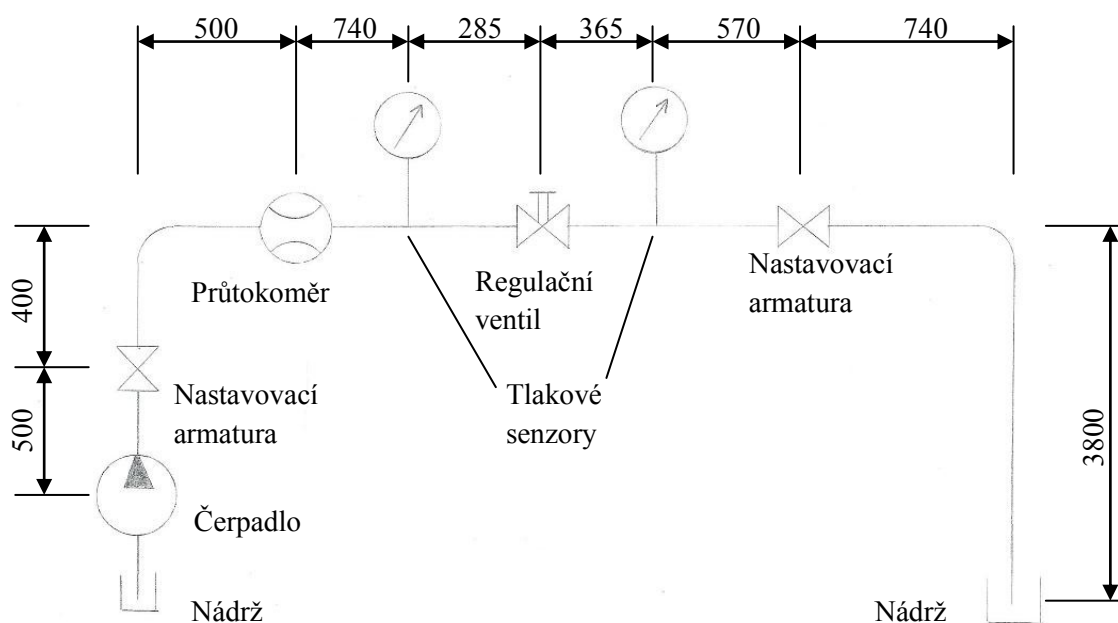
### Přesnost zkoušky

Při dodržení postupů z normy ČSN EN 60534 se mezní úchylka pohybuje v rozmezí  $\pm 5 \%$  pro armaturu mající poměr  $C/d^2 \leq N_{25}$

### Ze zkoušky se dle normy zaznamenávají tyto údaje

- zdvih uzávěru armatury,
- vstupní tlak  $p_1$ ,
- tlakový spád ( $p_1 - p_2$ ) mezi tlakovými odběry,
- vstupní teplota tekutin  $T_1$ ,
- objemový průtok  $Q$ ,
- atmosférický tlak,
- fyzikální popis zkušebního vzorku (tzn. Typ armatury, jmenovitá světlost, jmenovitý tlak, směr průtoku).

### Schéma zkušebního obvodu

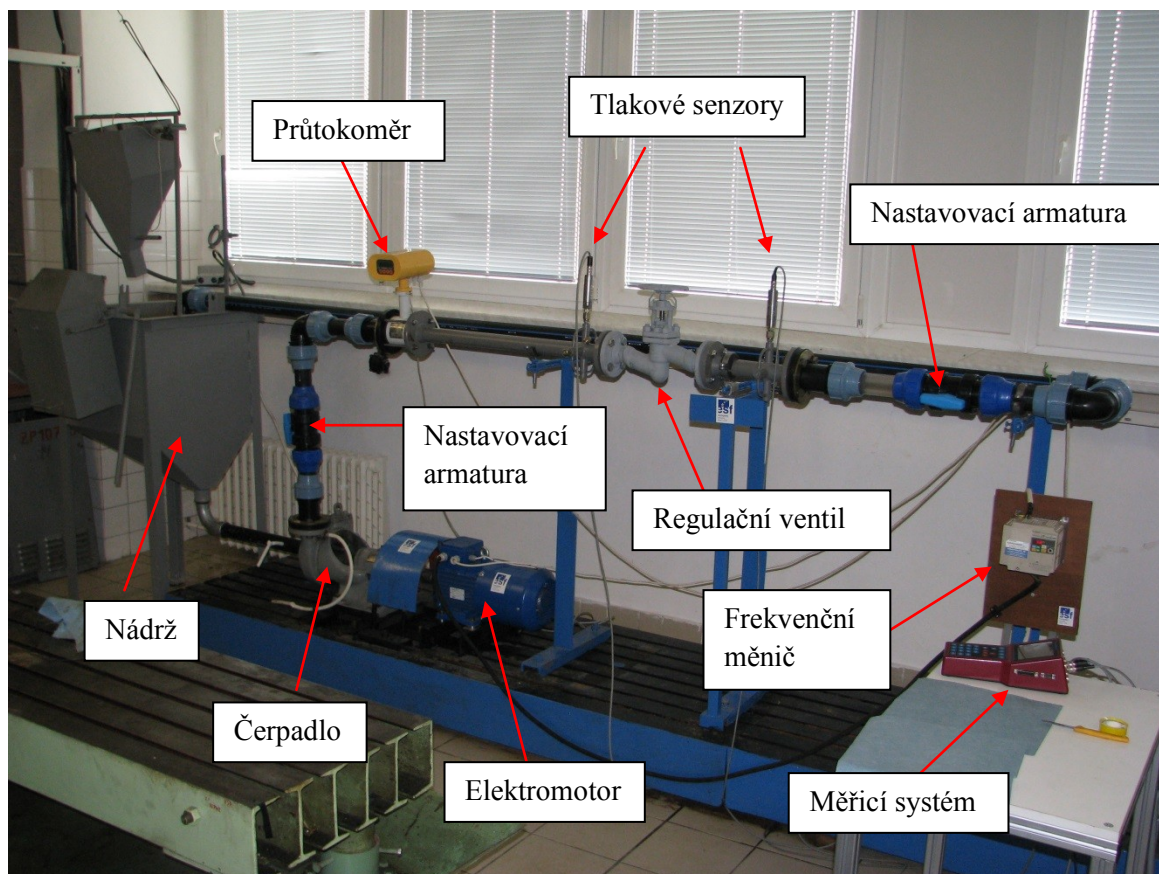


Obr. 5.5 Schéma zapojení zkušebního obvodu, délky jsou uvedeny v mm



## 5.8 Zkušební obvod

Zkušební obvod byl, sestaven z dílčích potrubí viz obr. 5.6. Jednotlivé díly potrubí jsou k sobě montovány pomocí mechanických spojek firmy Hydro Systém Zlín s.r.o typ UNIDELTA.



Obr.5.6 Fotografie zkušebního obvodu s popisem prvků

## 5.9 Prvky obvodu

### Průtokoměr

Firma: Elis Plzeň a.s.

Typ: Indukční průtokoměr IS 0.110

Velikost: DN 50

Průtok: Min:0,72 m<sup>3</sup>/h

Max:72 m<sup>3</sup>/h

Buzení: 3,125 Hz

Přesnost: Dle kalibrační listiny je přesnost  $\pm 5\%$



Obr.5.7 Průtokoměr [14]

### **Nastavovací armatury**

Firma: PCV alfa a.s.

Typ: Uzavírací kulový ventil

Velikost: DN 40

### **Tlakové senzory**

Firma: Hydrotechnik

Typ: PR 300

Měřicí rozsah: -1 do 6 bar

Napájecí napětí: 4 až 20 mA



*Obr.5.8 Tlakový senzor [13]*

### **Měřicí systém**

Firma: Hydrotechnik

Typ: 5050

### **Čerpadlo**

Firma: Sigma Hranice

Typ: NZ-3-165-S

Max průtok: 300 l/min

### **Potrubí**

Firma: PCV alfa a.s.

### **Mechanické spojky**

Firma: Hydro System Zlín s.r.o

## **5.10 Postup zkoušky**

Nejprve bylo zapotřebí připojit mnou zvolená tlaková čidla k měřicímu přístroji Hydrotechnik 5050, který jsem použil pro měření vstupního a výstupního tlaku. Po připojení bylo nutno tlakové senzory nastavit a zkalibrovat, tak aby měřily pouze přetlak vznikající při proudění kapaliny v regulačním ventilu. Po kalibraci jsem mohl dané senzory připojit do obvodu.

Dále jsem spustil čerpadlo a pomocí frekvenčního měniče jsem měnil otáčky elektromotoru, takže i čerpadla čímž jsem měnil průtok v obvodu. Také jsem

vyzkoušel metodu řízení průtoku pomocí nastavovacích armatur. Obě tyto regulace průtoku měly stejné výsledky. Po nastavení požadovaného zdvihu regulačního ventilu a požadovaných otáček jsem mohl naměřená data zapisovat do tabulky viz kapitola naměřená data.

### 5.11 Naměřená data

Zde jsou uvedeny výsledky z měření pouze pro zdvih kuželky 23,7 a 5 mm kompletní přehled výsledků z měření včetně přepočtených hodnot naleznete v příloze 1.

Měření č.	Zdvih	p1	p2	Q	Frekvence
[-]	[mm]	[bar]	[bar]	[m <sup>3</sup> /h]	[Hz]
1	23,7	-0,017	-0,04	3,045	5
2		0,067	-0,03	6,233	10
3		0,207	-0,015	9,409	15
4		0,4	0,02	12,6	20
5		0,639	0,034	15,798	25

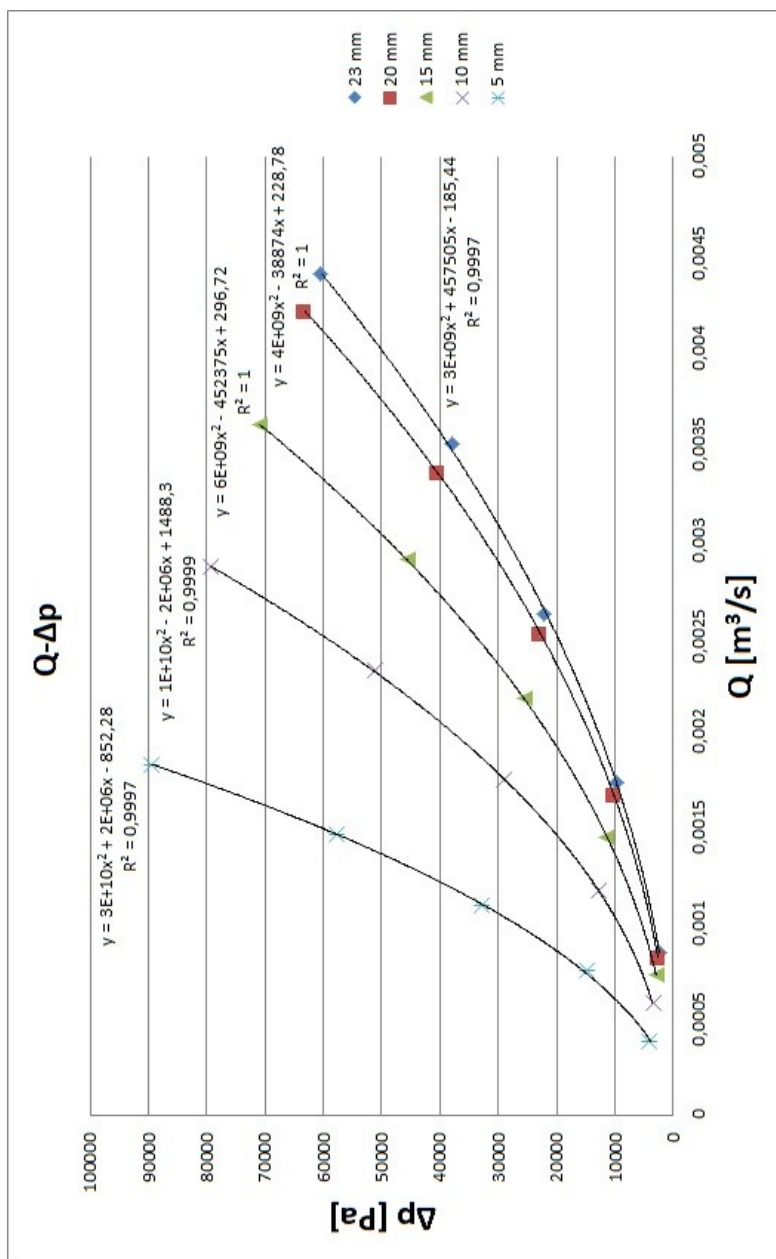
Tab.5.2 Naměřené hodnoty pro zdvih 23,7mm

Měření č.	Zdvih	p1	p2	Q	Frekvence
[-]	[mm]	[bar]	[bar]	[m <sup>3</sup> /h]	[Hz]
1	5	-0,003	-0,044	1,38	5
2		0,107	-0,041	2,722	10
3		0,292	-0,037	3,922	15
4		0,546	-0,032	5,279	20
5		0,869	-0,025	6,585	25

Tab.5.3 Naměřené hodnoty pro zdvih 5mm

## Vyhodnocení měření

Měření jsem vyhodnotil závislosti tlakového spádu na průtoku, čímž vyšly dílčí charakteristiky pro jednotlivá uzavření regulačního ventilu. Ke každé charakteristice jsem přiřadil spojnicí trendu.



Obr. 5.9 Graf závislosti tlakové ztráty na průtoku z naměřených hodnot – charakteristika regulačního ventilu

## 6 Matematické modelování

Matematickým modelováním se dá simulovat spousta jevů od přestupu tepla přes proudění až po namáhání různých součástí. Zde se zabývám pouze modelováním, ustáleném (stacionárním) proudění tekutiny.

Hned na úvod je třeba zmínit, že v této práci jakožto proudění v regulačním ventilu se jedná o turbulentní proudění. Proto se dále budeme zabývat pouze turbulentním modelováním a veškeré použité modely při matematické simulaci jsou turbulentní modely.

K matematické simulaci jsem použil metody CFD modelování, konkrétně software ANSYS Fluent společnosti ANSYS. Numerické CFD modelování se opírá o Navier-Stokesovou rovnici (6.1) a rovnici kontinuity (6.2).

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z\end{aligned}\quad (6.1)$$

kde:

$u, v, w$	jsou složky rychlosti
$p$	je tlak
$\rho$	je hustota
$\nu$	je kinematická viskozita
$f_x, f_y, f_z$	jsou složky vnější objemové síly

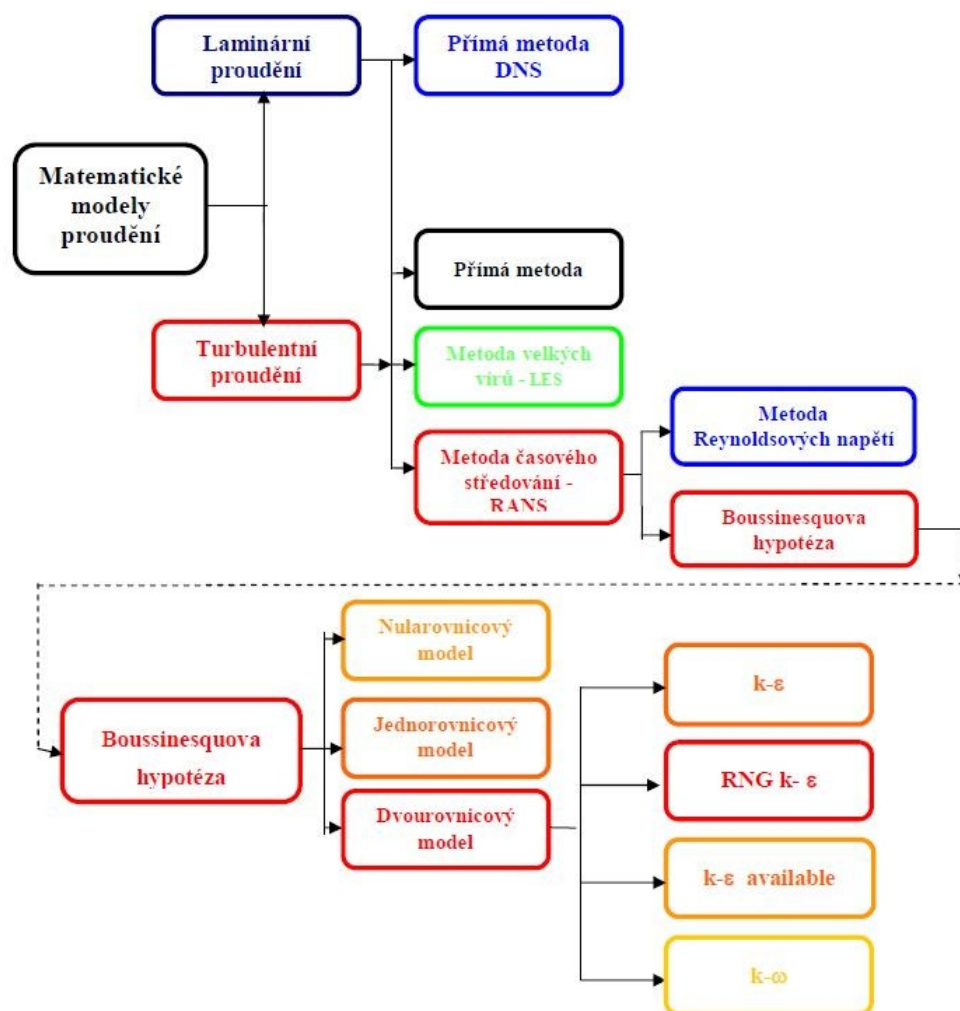
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.2)$$

kde:

$u, v, w$	jsou složky rychlosti
-----------	-----------------------

Modely pro řešení turbulentního proudění:

- DNS (Direct Numerical Simulation)
- LES (Large Eddy Simulation)
- RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)



Obr. 6.1 Rozdělení matematických modelů [1]

## 6.1 DNS

Touto metodou lze určit všechny velikosti turbulentních fluktuací, jelikož nemodeluje turbulenci, tak řeší Navier-Stokesovy rovnice s velkou přesností. U této metody je zapotřebí velice jemná síť. Tato metoda se používá jen velice zřídka většinou pro výzkumné účely. Používá se pro malá Reynoldsova čísla a poskytuje dokonalý obraz fyziky proudění tekutiny.

## 6.2 LES

Charakteristické veličiny jako jsou hybnost, hmota energie a další jsou přenášeny velkými víry. Tato metoda řeší pouze velké víry. Při simulaci se řeší filtrovaná 3D nestacionární Navier-Stokesová rovnice. Jelikož řešíme jen velké víry tak je možné použít hrubší síť a větší časový krok než u DNS metody. Hlavní nevýhodou této metody je nutnost velmi jemné sítě u stěn ve všech třech směrech. Tento problém se dá odstranit pomocí různých modifikací a hybridních modelů RANS/LES.

## 6.3 RANS

Jedná se o nejvíce používanější metodu matematického modelování turbulentního proudění, zejména proto, že vzhledem k rozměrům a velikosti Reynoldsova čísla jde o nejelektroničtější metodu. Jak už bylo uvedeno tak metody DNS a LES mají oproti metodě RANS obrovské výpočetní nároky. Simulace je provedena pomocí Navier-Stokesových rovnic středovaných podle Reynoldse, dále používá časově zprůměrované hodnoty proudění což má za následek zmíněné nižší výpočetní nároky. Existují rozdílné modely RANS, které zjednodušují problém přidáním dalších transparentních rovnic. Např.: modely  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  přidávají navíc turbulentní viskozitu. Naopak model RSM turbulentní viskozitu nepoužívá. Pro časově závislé měřítko se používá metoda URANS.

Výsledky vypočtené metodou RANS by měly být vždy doplněny ověřovacím experimentem. Tyto metody nelze použít pro modelování nestabilit jakéhokoliv druhu. Metodami RANS tedy nelze spolehlivě modelovat přechod do turbulence ani odtržení mezní vrstvy.

V této práci jsem používal pouze dvourovnicové modely, které jsem popsal v následujících kapitolách, pro danou aplikaci mi byly tyto modely doporučeny.

### 6.3.1 $k-\epsilon$ standart

Jde o semi-empirický model, kde se odvozené rovnice spoléhají na úvahu o empirii. Tento model předpokládá plně rozvinuté turbulentní proudění (vysoká Reynoldsova čísla) přičemž efekt molekulární viskozity je zanedbatelný. Postupem času se z tohoto modelu vyvinuly další modifikace řešící tyto nedostatky.

### 6.3.2 k-ε RNG

Tento model je jednou z modifikací již zmíněného modelu k-ε standart, je odvozen pomocí statistické metody (nenormalizationgroupmethod-RNG). Model zahrnuje účinek vírů na turbulenci a tím se zvyšuje přesnost pro vířivé proudění. Je přesnější a spolehlivější než k-ε standart. Používá se zejména pro nižší Reynoldsova čísla turbulentního proudění.

Transportní rovnice pro výpočet kinetické turbulence k (6.3) a disipace kinetické energie ε (6.4) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6.4)$$

kde:

$G_k$  je generace kinetické turbulence k v důsledku gradientů střední rychlosti

$G_b$  je generace kinetické energie turbulence k v důsledku vztlaku

$Y_M$  představuje příspěvek od fluktujičních dilatací při stlačitelném turbulentním proudění k celkové disipaci

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  jsou konstanty modelu

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  jsou inverzní efektivní Prantlová čísla pro k a ε

$S_k, S_\varepsilon$  jsou uživatelsky definované zdrojové členy a

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6.5)$$

kde:

$$\eta = S_k / \varepsilon$$

$$\eta_0 = 4,38$$

$$\beta = 0,012$$



Přepis transportní rovnice pro  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k\mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}^*\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6.6)$$

kde:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu\eta^3(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta\eta^3} \quad (6.7)$$

Diferenciální rovnice pro turbulentní viskozitu, pro nižší Reynoldsova čísla.

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (6.8)$$

kde:

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$$

$$C_v \approx 100$$

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
1,42	1,68	0,0845

Tab.6.1 Konstanty pro k- $\varepsilon$  RNG

### 6.3.3 k- $\omega$ standart

Obsahuje modifikace pro nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost a smykové proudění. Lépe snáší záporný tlakový spád, mezní vrstvy a odtržení proudění. Slabinou tohoto modelu je citlivost při řešení hodnot  $k$  a  $\omega$  ve volném proudu mimo smykové vrstvy, to znamená, že model je poměrně přesný v blízkosti stěny, avšak s rostoucí vzdáleností tato přesnost klesá. Dá se říci, že jeho přesnost je opačná ke k- $\varepsilon$ . [1]

### 6.3.4 k- $\omega$ SST

Tento model spojuje přesnost u stěny modelu k- $\omega$  standart a přesnost ve volném proudění modelu k- $\varepsilon$ . To je dosaženo tím, že jsou použity oba modely zároveň a násobeny funkcí, která je rovná 1 v blízkosti stěny což aktivuje model k- $\omega$  standart a 0 daleko od stěny což aktivuje model k- $\varepsilon$ . Z toho plyne, že tento model je přesnější a spolehlivější pro více typu proudění než k- $\omega$  standart.

Transportní rovnice SST:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega\end{aligned}\quad (6.9)$$

kde:

$\tilde{G}_k$  je generace kinetické energie turbulence  $k$  v důsledku gradientu střední rychlosti vypočtené z  $G_k$

$D_\omega$  reprezentuje příčnou difuzi

Turbulentní viskozita se vypočte ze vztahu:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]}\quad (6.10)$$



Obr. 6.2 Schéma průběhu výpočtu [1]

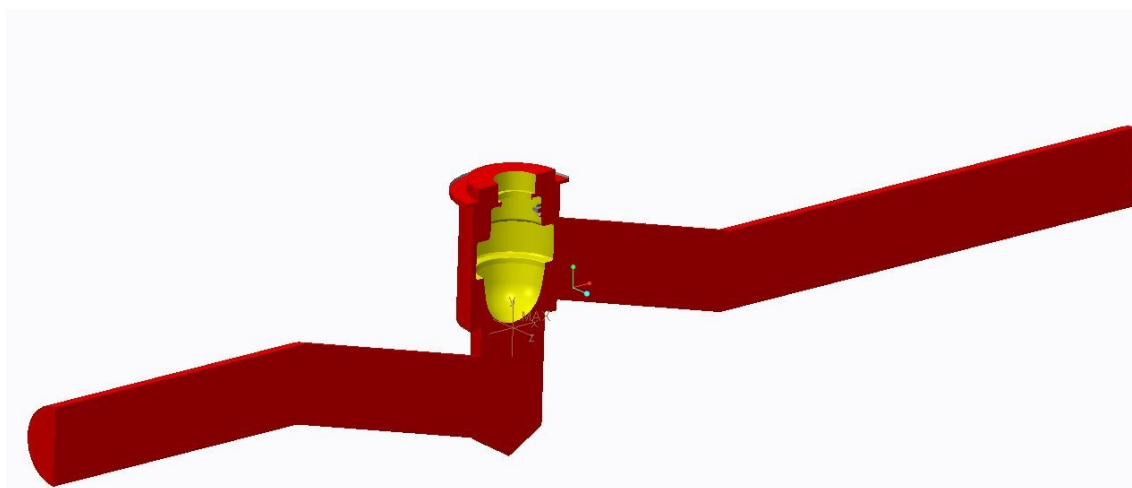
## 6.4 Konstrukční model ventilu

Při matematickém modelování jsem použil konstrukční modely dodané firmou Armatury Group a.s., které detailně vykreslují geometrii ventilu. Tyto modely jsem dále

upravil dle potřeb v programu CreoParametric 2.0 následně pak v programu Workbench.

Jelikož je model symetrický, tak jsem pro rychlejší výpočet používal pouze polovinu geometrie daného ventilu. Správnost výpočtu s poloviční geometrií jsem ověřil porovnáním s plnou geometrií, viz obr. 6.10. Při porovnání jsem nezjistil významnějších odchylek.

Modely jsem vytvořil pro námi proměřené zdvihy kuželky v 5; 10; 15; 20 a 23,7 mm.



*Obr.6.3 Model pro maximální zdvih (23,7mm)*

## 6.5 Tvorba sítě

Tvorba výpočetní sítě lze rozdělit do dvou kategorií dle geometrie, na kterou ji chceme aplikovat.

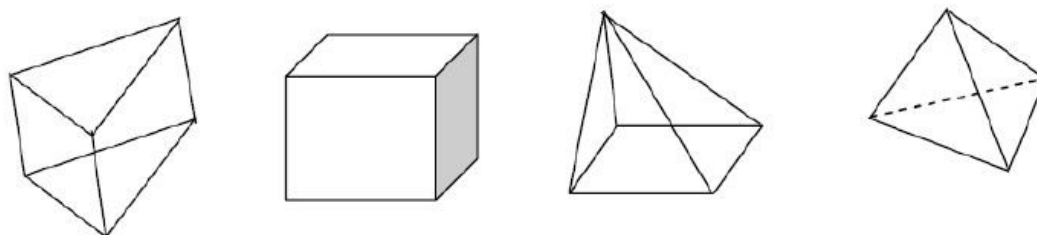
- 2D (Dvoudimenzionální)
- 3D (Třídimeznionální)

V této práci jsem používal pouze buňky v třídimeznionálním prostoru (3D). Při tvorbě výpočetní sítě se řídím třemi pravidly:

- *výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buně,*
- *výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti.* [1]

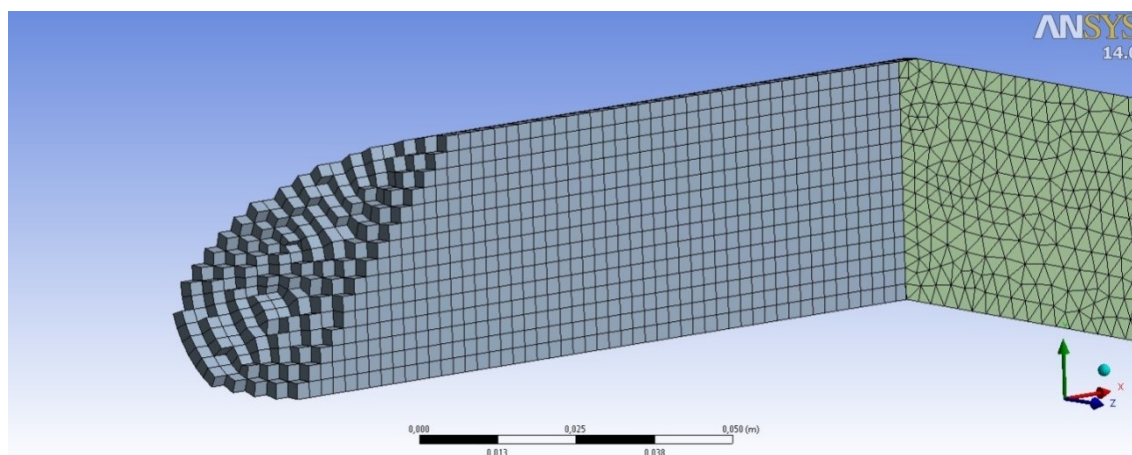
Limitujícím prvkem při tvorbě sítě je počet buněk, už jen proto, že v každé buňce jsou počítány různé veličiny. S ohledem na čas výpočtu je nutno redukovat počet buněk na potřebné minimum. Snížení počtu buněk by však nemělo mít za následek

zhoršení kvality sítě. Při tvorbě sítě jsem použil nástroje na zhušťování sítě v potřebné oblasti, to mělo za následek navýšení počtu buněk, které bylo nutné pro zajištění přesnosti modelování dané oblasti.

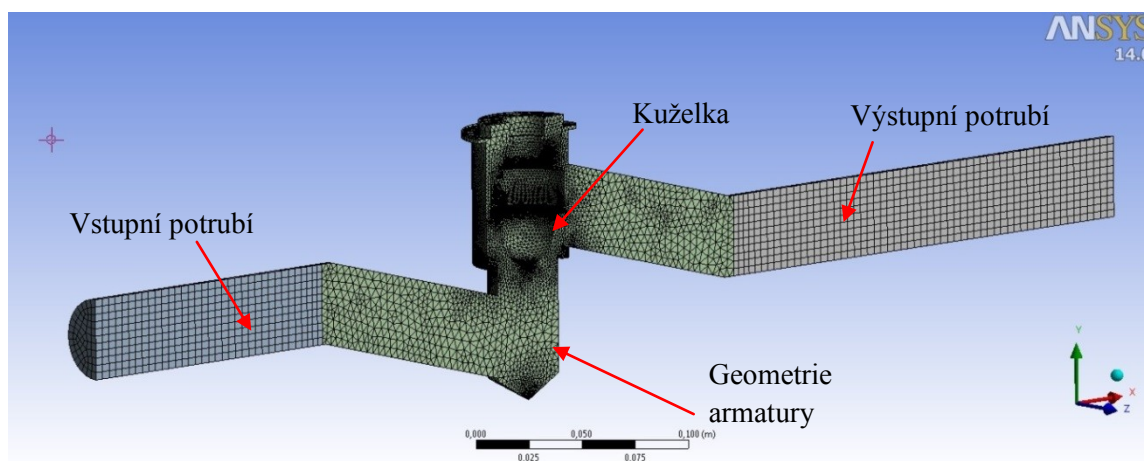


Obr.6.4 Ukázka tvarů elementu sítě[1]

Pro geometrii vstupního a výstupního potrubí do armatury jsem použil elementy sítě „Hex dominant“, které jsou pro rovné potrubí vhodnější, viz obrázek 6.5.



Obr.6.5 Elementy Hex Dominant vstupního potrubí



Obr.6.6 Ukázka sítě na celém modelu včetně pojmenování části modelu

### 6.5.1 Nastavení sítě

Po automatickém vygenerování sítě jsem v nastavení sítě (záložka „sizing“) změnil následující parametry, čímž došlo ke zjemnění sítě na mnou požadované parametry.

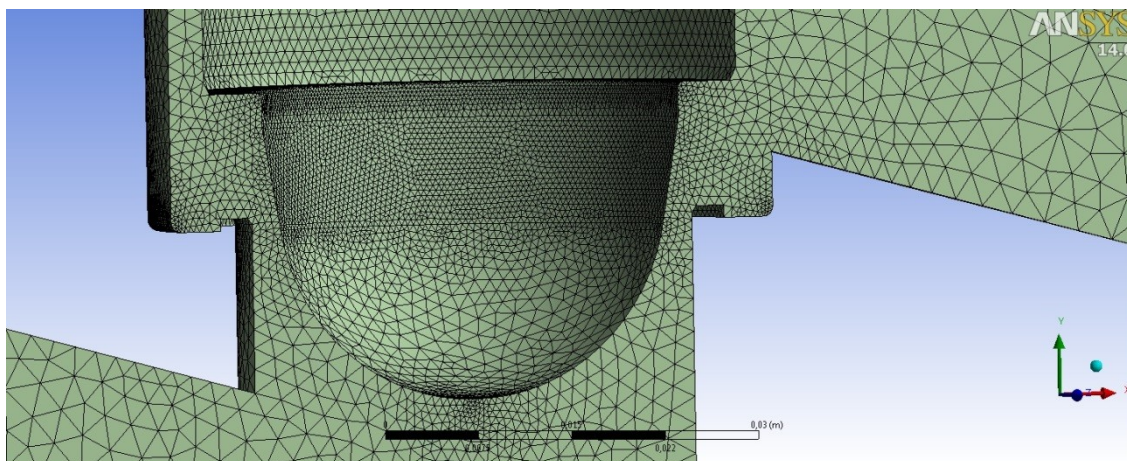
Měnil jsem parametry „Growthrate“ (růstový faktor), „Max size“ (maximální velikost) a „Max face size“, viz obr.6.2.

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3,2792e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	3,e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Size	3,e-003 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1150
Minimum Edge Length	1,6462e-004 m

Tab.6.2 Tabulka nastavující parametry sítě

### 6.5.2 Zjemnění sítě

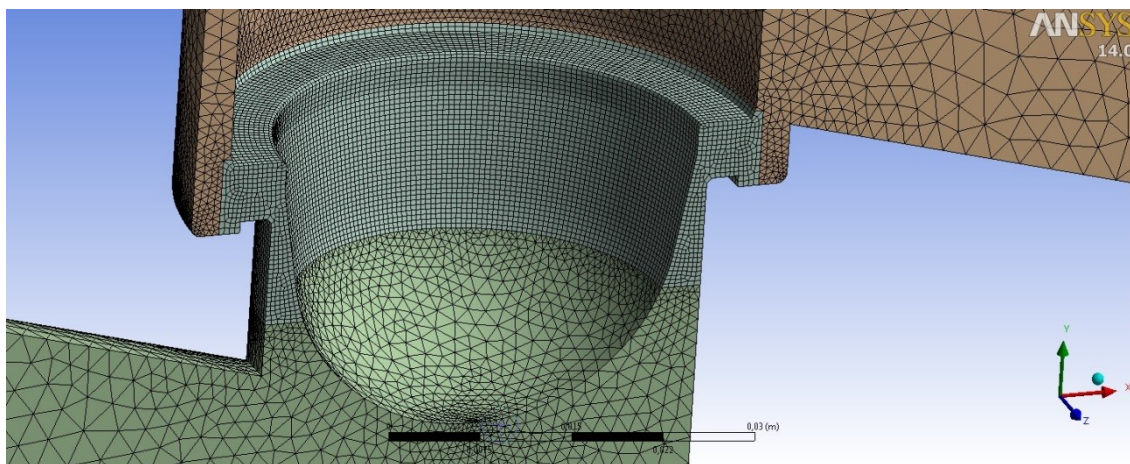
Síť jsem zjemňoval hlavně v ohnisku proudění (v nejužším místě mezi kuželkou a tělesem armatury). Pro modely 23,7, 20, 15 a 10mm jsem použil metodu zjemnění sítě pomocí nástroje „face sizing“, kde jsem nastavil danou velikost elementu na povrchu kuželky.



Obr.6.7 Detail sítě kolem kuželky použité pro modely 23,7, 20, 15 a 10mm



Pro model 5mm jsem v programu „Design modeler“ pomocí nástroje „materiál slice“ vytvořil geometrii ohraničující ohnisko proudění. Tuto geometrii jsem později zjemňoval zvlášť pomocí nástroje „body sizing“, přičemž jsem opět nastavoval potřebnou velikost elementu.



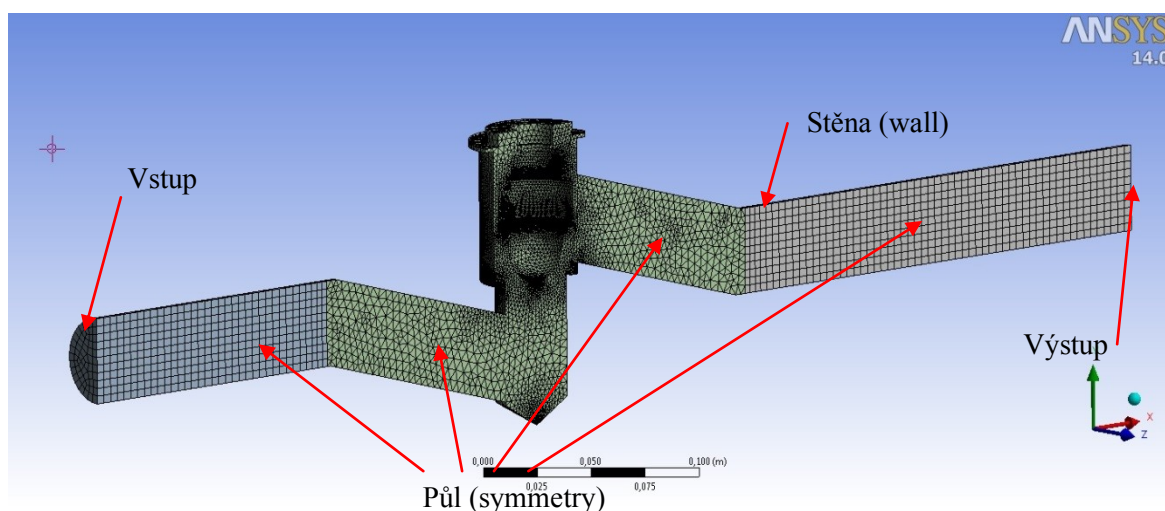
Obr.6.8 Detail sítě kolem kuželky použité pro modely 5mm

Při tvorbě sítě v nástroji „Mesh“ programu Workbench 14.0 jsem neopomenul pojmenovat plochy sítě což je důležitou součástí při práci v samotném nastavování Fluentu. Pomocí příkazu „Createnamedselection“.

- Vstup (zde jsem definoval „Inlet“ neboli plochu pro vstupní okrajovou podmínku)
- Pul (jde o plochu symetrii ventilu a potrubí ve fluentu definovanou jako „symmetry“)
- Výstup (výstup je plocha, na které je definován „outlet“ neboli výstupní okrajová podmínka)

Zdvih	Počet buněk
23,7 mm	384 966
20 mm	408 955
15 mm	366 971
10 mm	459 415
5 mm	345 222

Tab.6.3 Tabulka s počtem buněk jednotlivých modelů



Obr.6.9 Pojmenování ploch pro zadání okrajových podmínek

## 6.6 Nastavení Fluentu

V této kapitole se budu věnovat nastavení parametrů ve Fluentu pro daný model ventilu (zdvih). Dále budu vysvětlovat důvody zvolení jednotlivých nastavení.

### 6.6.1 General

Jelikož jsme z měření zjistili, že tlak na vstupu nevykazoval časovou závislost, tak nebyl důvod volit časově závislou úlohu. Z těchto důvodů jsem zvolil výpočet stacionární úlohy.

### 6.6.2 Models

V této záložce jsem nastavoval typy modelů, pro které jsem danou geometrii a síť počítal. Jak bylo zmíněno v kapitole matematické modelování. Používal jsem pouze dvourovnicové modely ( $k-\epsilon$  a  $k-\omega$ ). V modelech je také možnost nastavení stěnové funkce. Nasimuloval a porovnal jsem výpočty se všemi dostupnými stěnovými funkcemi a nejlepšími výsledky jsem dosáhl se stěnovou funkcí „non-equilibriumwall“ proto jsem ji aplikoval i pro všechny ostatní výpočty.

### 6.6.3 Materials

Při měření charakteristiky toho ventilu bylo jako pracovní médium zvolena voda ( $H_2O$ ), proto i pro matematickou modelaci jsem musel zvolit z databáze Fluentu vodu, zde uváděnou jako „water-liquid“.

Parametry Water-liquid:

- Hustota: 998,2 [kg/m<sup>3</sup>]
- Dynamická viskozita: 0,001003 [Pa·s]

#### **6.6.4 Okrajové podmínky**

Nejdůležitější je zde volba vstupní a výstupní okrajové podmínky. V mém případě počítám s poloviční geometrií, proto jsem zvolil rovinu symetrie.

Volba vstupní okrajové podmínky:

- Vstup - Massflowonlet - Mass flux (Mass flux je přepočítáno z naměřeného průtoku podle vzorce

$$\text{Mass flux} = \frac{Q \cdot \rho}{S} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (6.11)$$

Volba výstupní okrajové podmínky:

- Výstup – Pressureoutlet (zadal jsem naměřenou hodnotu tlaku p2 přepočítanou na základní jednotky - pascaly)

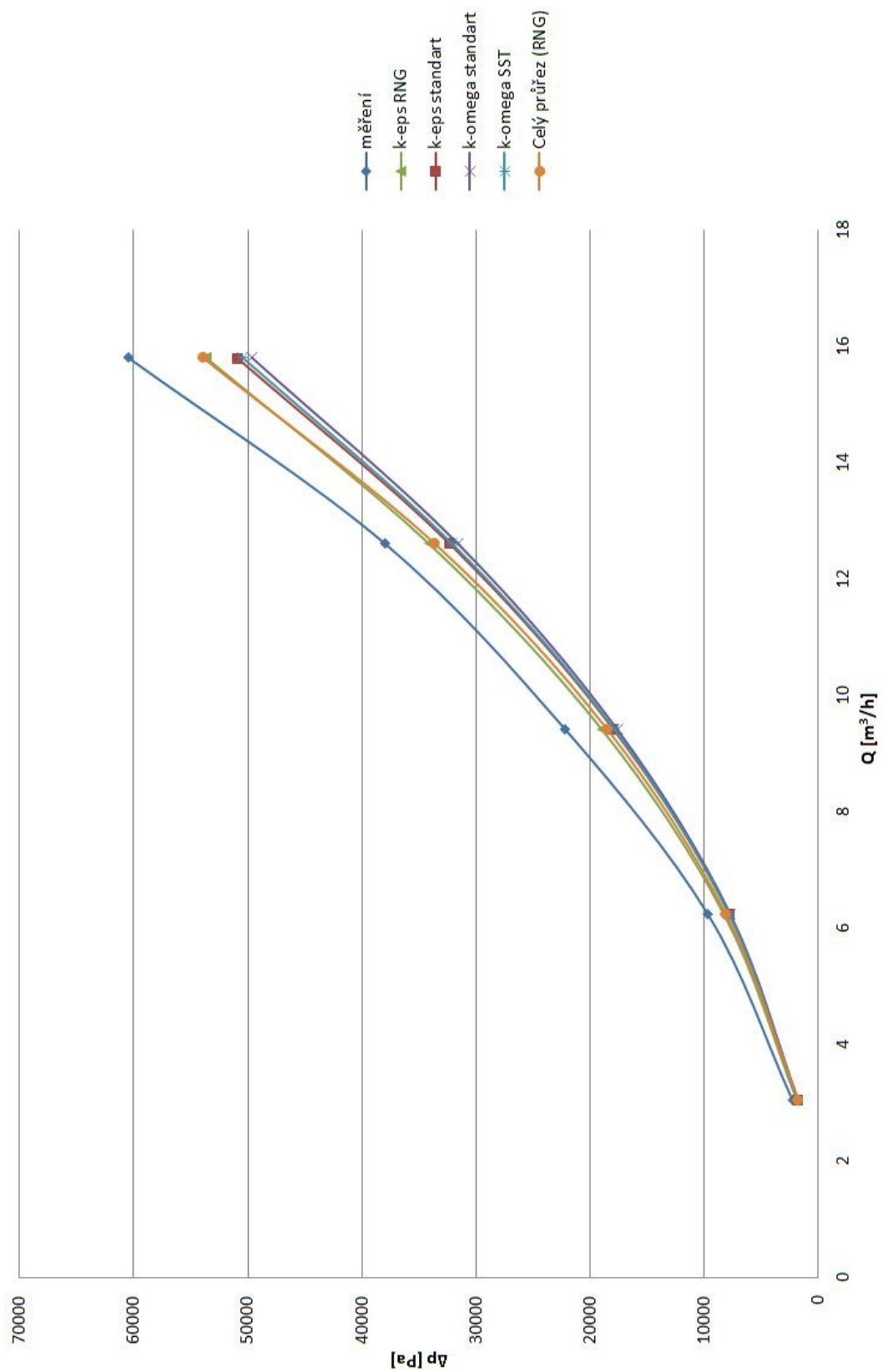
#### **6.6.5 Nastavení ostatních parametrů**

V ostatních záložkách jsem nechal původní nastavení Fluentu, jelikož nebyl důvod jej předefinovat. Z toho důvodu jsem mohl přejít inicializaci nastavení a dále ke spuštění výpočtu.

#### **6.7 Vyhodnocení matematické modelace**

Simulaci jsem provedl pro zdvihy kuželky 23,7; 20; 15; 10 a 5 mm. Vždy jsem vyhodnocoval statické tlaky a rychlosti na vstupu a výstupu. Z těchto veličin jsem dále počítal průtok a tlakovou ztrátu, kterou jsem zaznamenal do grafů. Pro zdvih 23,7 mm jsem provedl simulaci všech výše zmíněných modelů, výsledky jsou uvedeny v obr. 6.10.





Obr. 6.10 Závislost tlakové ztráty na průtoku pro zdvih 23,7mm

Tabulka 6.4 uvádí vypočtené hodnoty pro zdvih 23,7mm a model k- $\epsilon$  RNG, pro další zdvihy jsou tabulky vypočtených hodnot uvedeny v příloze 3, 5, 7 a 9.

**K-epsion RNG**

p <sub>stat.</sub> vstup	p <sub>stat.</sub> výstup	v vstup	v výstup	Q	$\Delta p$	Odchylka
[Pa]	[Pa]	[m/s]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /h]	[Pa]	[%]
-2072,6025	-4000	0,7303524	0,73301035	3,0450	1927,3975	16,20%
5295,7173	-3000	1,4950037	1,5014166	6,2330	8295,7173	14,48%
17503,008	-1500	2,256777	2,266705	9,4090	19003,008	14,40%
36142,992	2000	3,0221479	3,0357308	12,6000	34142,992	10,15%
57089,371	3400	3,7891977	3,8064201	15,7980	53689,371	11,26%

*Tabulka 6.4*

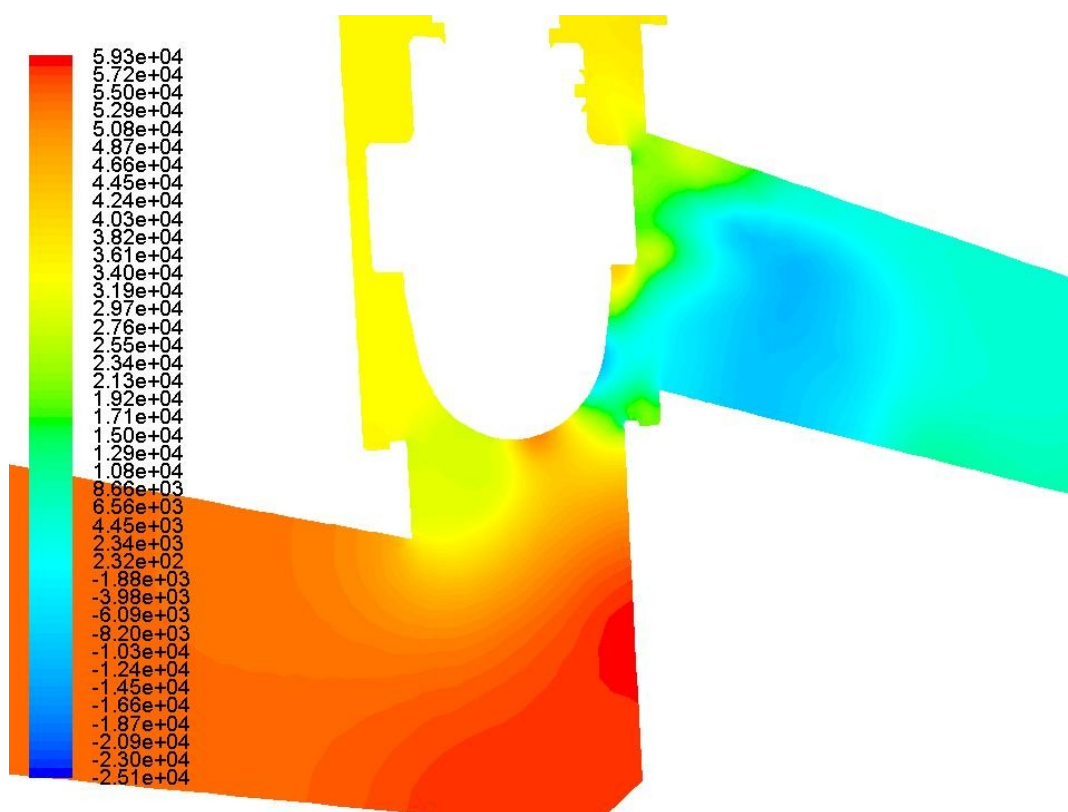
Po porovnání všech nasimulovaných modelů jsem usoudil z obr. 6.10, že je model k- $\epsilon$  RNG nejvhodnější a při dalších výpočtech jsem používal výhradně tento model. Zbylé dvourovnicové modely se ukázaly jako méně přesné.

Také jsem porovnal simulaci pro celou geometrii ventilu s poloviční, ovšem po zjištění totožných výsledků jsem pro urychlení výpočtu dále používal pouze poloviční geometrii.

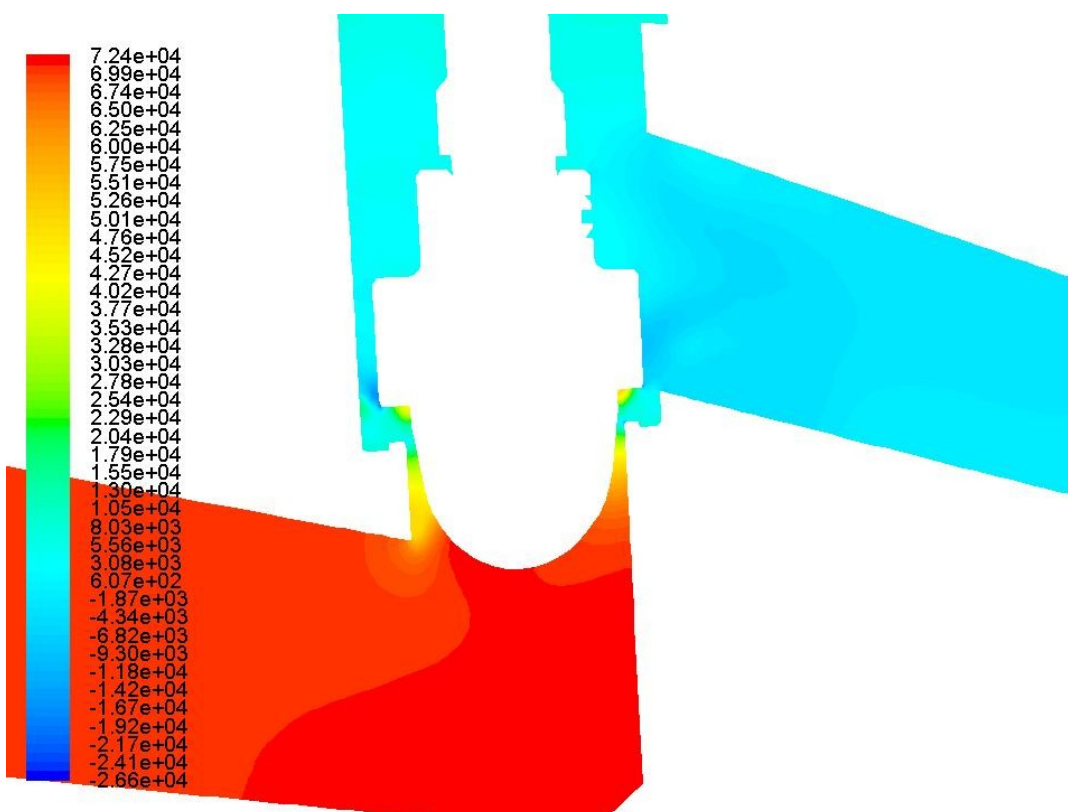
## **6.8 Grafické vyhodnocení simulace**

Grafické vyhodnocení jsem provedl pomocí programu AnsysFluentpo dokončení výpočtu jsem v záložce „Graphic and animation“vyhodnotil statické tlaky a rychlosti pomocí kontur a vektorů. Do diplomové práce jsem zařadil pouze grafické vyhodnocení pro zdvihy 23,7 a 5 mm dalšígrafické vyhodnocení je v příloze 3, 5, 7 a 9 nebo na přiloženém DVD.

### 6.8.1 Statické tlaky



Obr. 6.11 Statický tlak pro  $Q=15,8\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 23,7mm



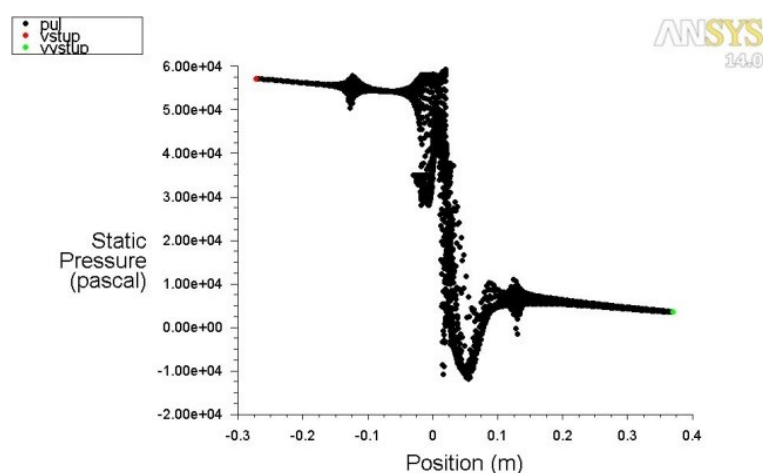
Obr. 6.12 Statický tlak pro  $Q=6,585\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 5mm

Vykreslení kontur tlaku nám potvrdilo výsledky měření, to znamená, že na vstupu je větší tlak než na výstupu.

Z obrázků je patrný nárůst tlaku ve vstupní části s postupným přivíráním ventilu. Dále je možno vidět z obrázku patrný pokles tlaku do záporných čísel v oblasti za kuželkou způsobené zavíráním kapaliny.

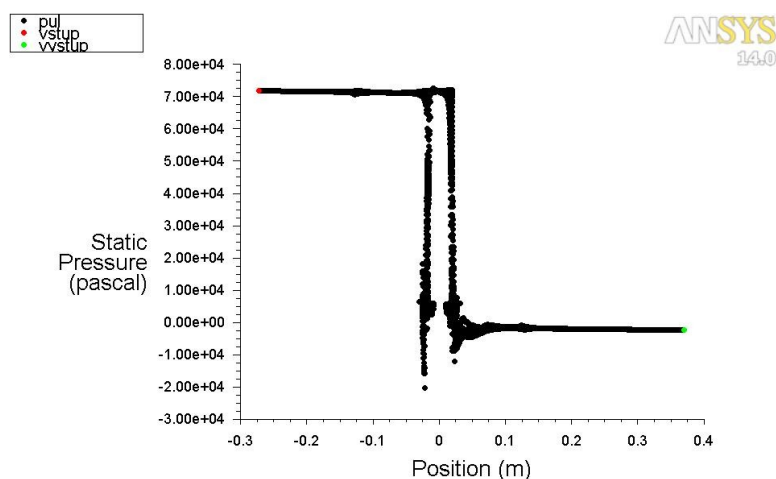
### 6.8.2 Statický tlak v XY grafu

Z obr. 6.13 a 6.14 vykreslujících statický tlak ve ventilu je patrné, že nedostáváme na tlak nasycených par vody, čímž nedochází ke kavitaci ve ventilu.



Static Pressure May 11, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rngke)

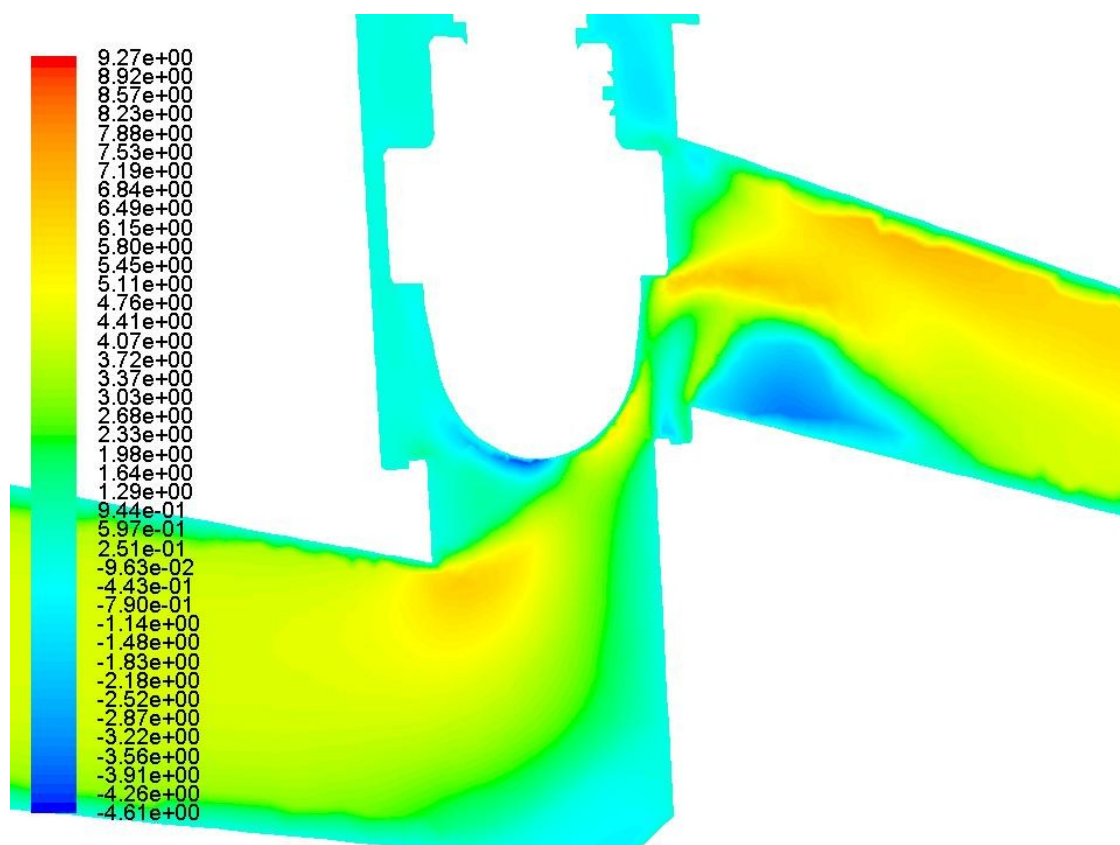
Obr. 6.13 Zdvihkuželky 5mm



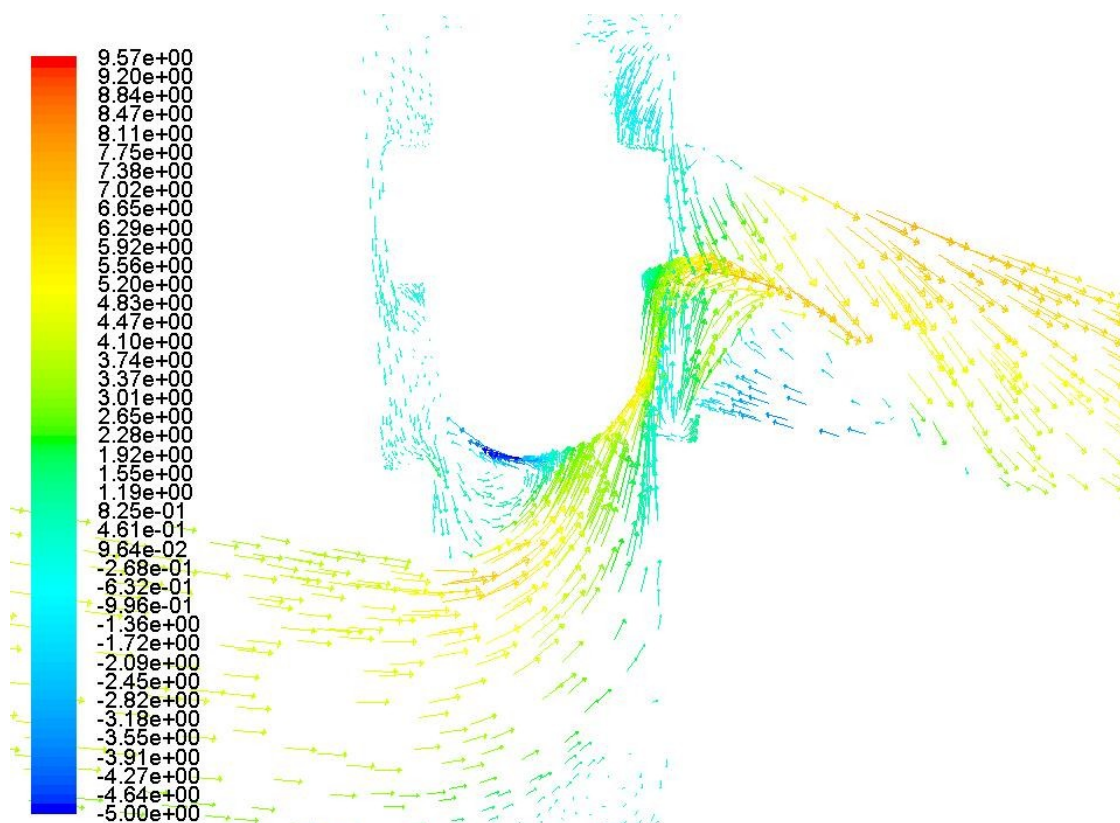
Static Pressure May 11, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, rngke)

Obr. 6.14 Zdvihkuželky 23,7mm

### 6.8.3 Rychlosti proudění

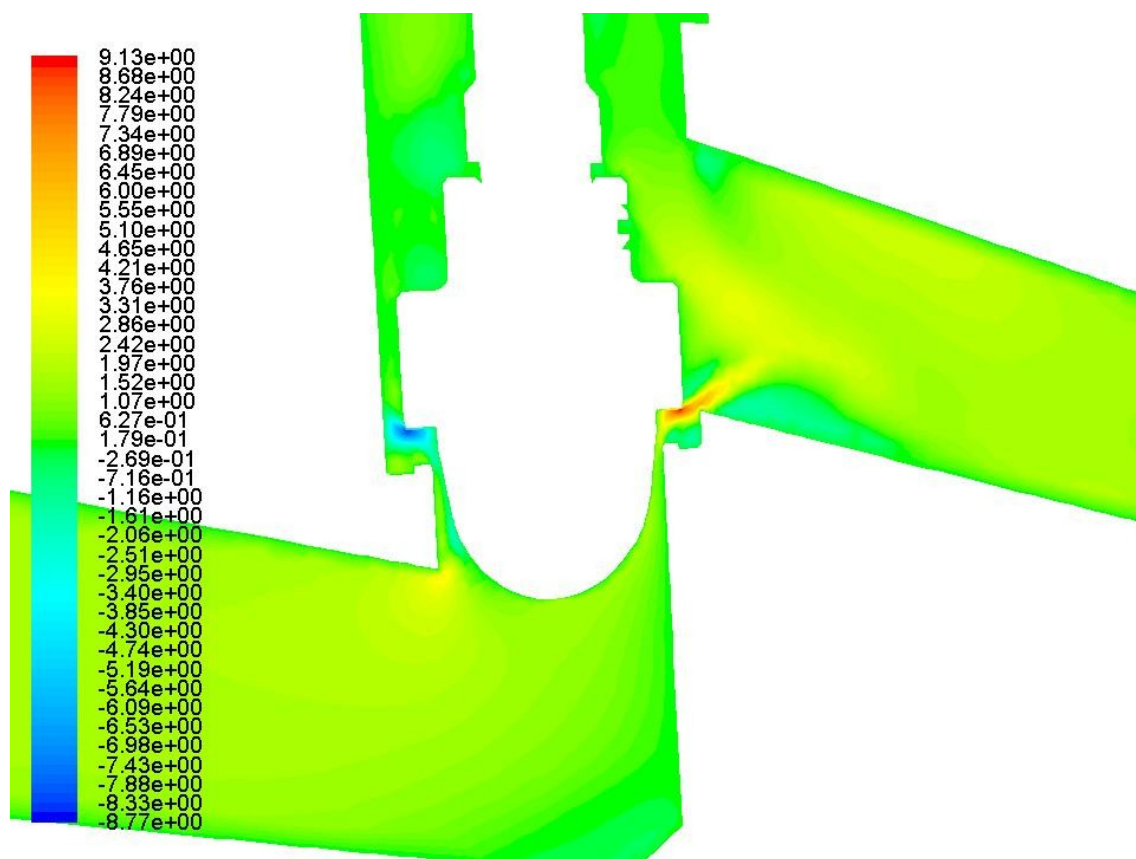


Obrázek 6.15 Vyhodnocení rychlosti kapaliny v ose x pro  $Q=15,8\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 23,7mm

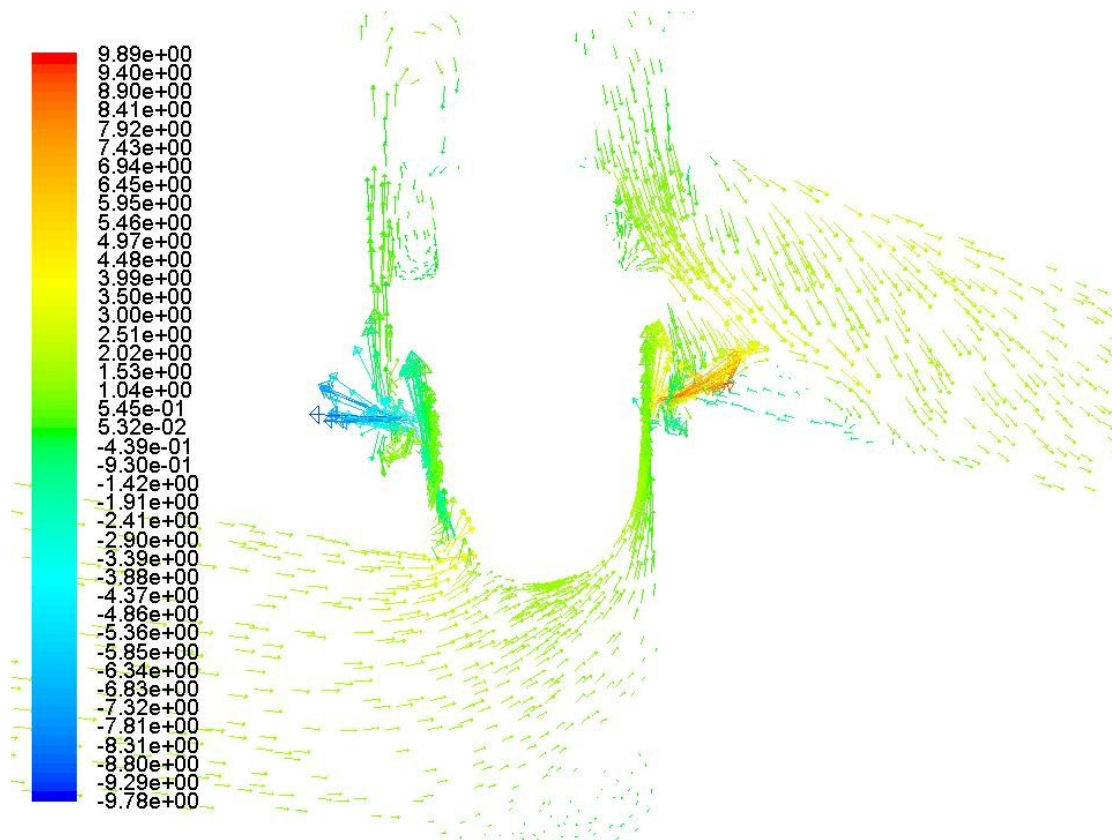


Obr. 6.16 Vektory rychlosti kapaliny pro  $Q=15,8\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 23,7mm





Obr.6.17 Detail rychlosti kapaliny v ose x pro  $Q=6,585\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 5mm



Obr.6.18 Vektory rychlosti kapaliny pomocí pro  $Q=6,585\text{m}^3/\text{h}$  a zdvih kuželky 5mm

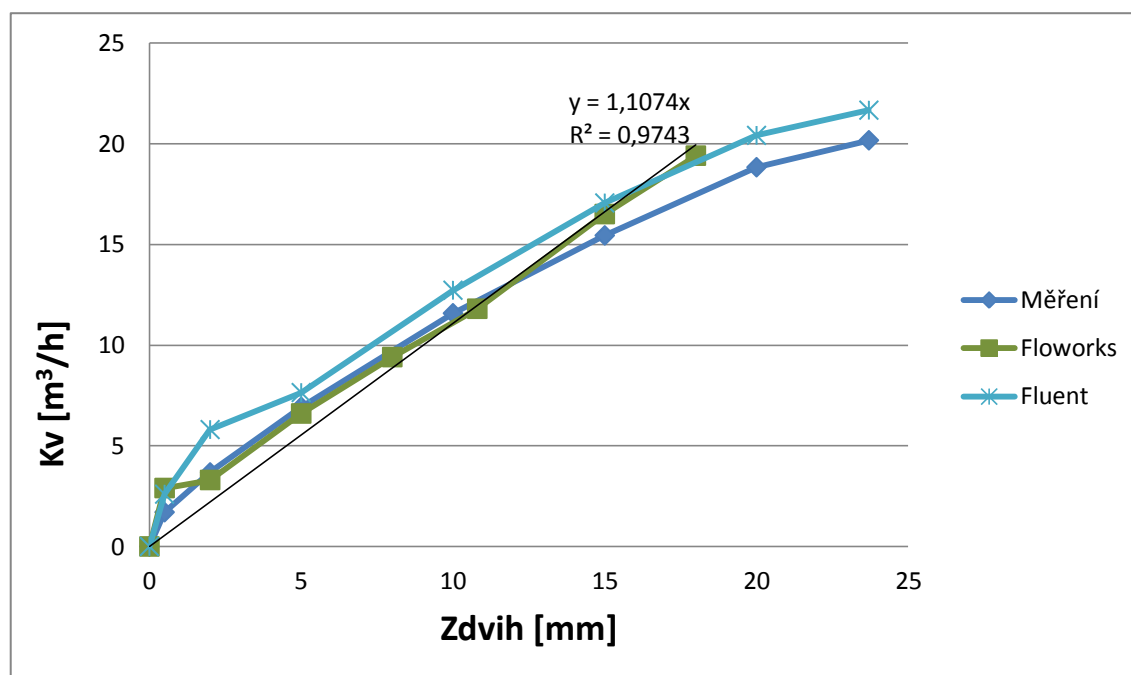
Při vykreslení rychlosti se nám potvrdil předpoklad, že k maximální rychlosti dochází v nejužším místě mezi kuželkou a tělesem ventilu. Při zdvihu 5mm zde dochází k rychlosti až 9,13 m/s v ose x.

Dále je patrné již zmíněné zavíření v oblasti těsně za tímto nejužším místem. Toto zavíření je patrné zejména z obrázku (6.16) a (6.18), které jsou vykresleny pomocí vektorů směru proudění.

Obrázky (6.15) a (6.18) ukazují vyhodnocení kontur rychlosti pouze v ose x. Je zde patrný obtok kuželky ze zadní strany znázorněný modrou barvou tedy zápornými čísly.

## 6.9 Charakteristika regulačního ventilu

Charakteristika udává závislost součinitele  $k_v$  na zdvihu kuželky. Jde o typickou křivku charakterizující regulační ventil a jeho schopnost regulace. Změřené i nasimulované data jsem měl možnost porovnat s daty poskytnuté firmou Armatury Group a.s., viz obr. 6.19. Křivky s jistou odchylkou kopírují tvar, což dokazuje určitou shodu.



Obrázek 6.19 Závislost průtokového součinitele  $k_v$  na zdvihu kuželky

## **7 Závěrečné shrnutí**

Rozdělil jsem diplomovou práci do tří hlavních částí. První je teoretický úvod do přehledu regulačních armatur, kam jsem zařadil rozdělení, návrh a řešení problematiky regulačních ventilů.

Ve druhé části je podrobně popsáno měření, které proběhlo v areálu VŠB-TUO dále se zde zabývám normou, která byla návodem pro sestavení měřicího obvodu. Veškeré naměřené a přepočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze 1.

Třetí část se zabývá matematickým modelováním regulačního ventilu. Je zde popsán postup tvorby geometrie i výpočetní síť modelu. Taktéž jsou zde uvedeny jednotlivé metody modelování a shrnutí výsledků.

V diplomové práci se zabývám problematikou proudění kapaliny v regulačním ventilu od firmy Armatury Group a.s. Cílem této práce bylo proměřit tento ventil podle normy ČSN EN 60534-2-3 zabývající se zkušebními postupy pro regulační armatury pro průmyslové procesy, čímž jsem definoval charakteristiky příslušného ventilu.

Dále jsem vytvořil v programu AnsysFluent matematickou modelaci pro příslušné polohy ventilu (totožné s měřením). Z matematické modelace jsem vyhodnotil průběh tlaku a rychlosti pro jednotlivé zdvihy regulačního ventilu.

Hodnoty tlaku a rychlosti (průtoku) získané měřením a z matematického modelování jsem porovnal a vysledovat případné odchylky patrné z grafů naměřených a nasimulovaných hodnot. Vypočetl jsem hodnoty odchylek, které se pohybují v rozmezí od 10% do 20%, viz přílohy 3, 5, 7 a 9. Porovnal jsem statické charakteristiky naměřené a nasimulované s dodanými firmou Armatury Group a.s., viz obr. 6.19.

Tyto odchylky zdůvodňují tím, že mnou použité matematické modely ( $k-\varepsilon$  standart, RNG a  $k-\omega$  standart, SST) nejsou vhodné takto nízká Reynoldsova čísla jako uvádělo měření, ačkoliv jsou tyto modely doporučené literaturou. Dále se při nízkých zdvích kuželky jednalo o přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním, čili ne o plně rozvinuté turbulentní proudění s výjimkou oblasti ohniska (okolí kuželky), kde jsem zjistil ryze turbulentní proudění.



Jeden z dalších možných důvodů vysvětlení této odchylky je, že jsem se pohyboval na hranici měřitelného průtoku. Dále jsme v matematické modelaci počítali s čistou kapalinou, kdežto při měření se jednalo spíše o kapalinu s částicemi (rez).

## Seznam použitých pramenů

### Knihy

- [1] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT,CFX*. Ostrava: VŠB-TUO, 2000, ISBN 978-80-248-1913-6
- [2] MIKULKA, J. a kol., *Potrubí a armatury*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974, 585s
- [3] ČSN EN 1267 Průmyslové armatury – Měření průtokových ztrát s použitím vody jako zkušební tekutiny. Srpen 2012
- [4] ČSN EN 60534-2-3 Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy. Prosinec 1999.
- [5] ROČEK, J. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. S.r.o., 2002, 204s
- [6] VLČEK P.: *Modelování turbulentního proudění Praha: ČVUT*, 2013, 21s.
- [7] KOL AUTORŮ: *Regulační armatury 4. Doplněné a upravené vydání*, LDM, spol s.r.o., 2006. 166s.
- [8] KOLÁŘ, Václav. *Hydraulika průmyslových armatur. 1. vyd.* Praha: SNTL, 1963, 652 s.

### Internet

- [9] tzb-info.cz [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z www: <<http://www.tzb-info.cz/2181-regulacni-armatury-teoreticka-zakladna-i>>.
- [10] tzb-info.cz [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z www: <<http://www.tzb-info.cz/2198-regulacni-armatury-teoreticka-zakladna-ii>>.
- [11] tzb-info.cz [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z www: <<http://www.tzb-info.cz/4229-prakticke-priklady-zapojeni-s-dvoucestnymi-a-tricestnymi-regulacnimi-ventily-ta-i>>.
- [12] [e-automatizace.cz](http://www.e-automatizace.cz) [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z www: <[http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny/Akc\\_pneu.html](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/Akc_pneu.html)>
- [13] hydrotechnik.com [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z www: <[http://www.hydrotechnik.com/english/PR310\\_DSEN.pdf](http://www.hydrotechnik.com/english/PR310_DSEN.pdf)>

- [14] kapka-vodomery.cz [online]. [cit.2014-05-05]. Dostupný z  
www: <<http://www.kapka-vodomery.cz/e-shop/vodomery/indukcni-prutokomery/elis-flonet-fn20xx-1>>
- [15] ic-cz.com [online]. [cit.2014-18-04]. Dostupný z www:  
<<http://ic-cz.com/problematika.html>>
- [16] tahydronics.com [online]. [cit.2014-20-04]. Dostupný z  
www: <<http://www.tahydronics.com/cs/energeticka-uinnost/ta-fusion-the-power-of-one/incorrect-control-valve-sizing/>>
- [17] Odbornecasopisy.cz [online]. [cit.2014-12-05]. Dostupný  
z www: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37920.pdf>>
- [18] polnacorp.eu [online]. [cit.2014-12-05]. Dostupný z  
www: <<http://www.polnacorp.eu/uploads/news/id5/armatury%20CZ.pdf>>

